

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日
Date of Application:

2002年 2月28日

出 願 番 号
Application Number:

特願2002-054093

[ST.10/C]:

[JP2002-054093]

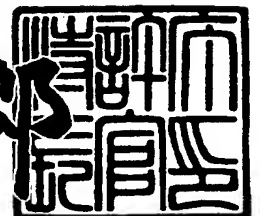
出 願 人
Applicant(s):

富士通株式会社

2002年12月17日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2002-3099358

【書類名】 特許願

【整理番号】 0250445

【提出日】 平成14年 2月28日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H04B 10/17

【発明の名称】 可変ファラデー回転子、光可変減衰器、光シャッタ及び
光可変等化器

【請求項の数】 5

【発明者】

【住所又は居所】 北海道札幌市北区北七条西四丁目 3 番地 1 富士通東日
本デジタル・テクノロジー株式会社内

【氏名】 長枝 浩

【特許出願人】

【識別番号】 000005223

【氏名又は名称】 富士通株式会社

【代理人】

【識別番号】 100072590

【弁理士】

【氏名又は名称】 井桁 貞一

【電話番号】 044-754-2462

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2001-135678

【出願日】 平成13年 5月 7日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011280

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1 .

【包括委任状番号】 9704486

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 可変ファラデー回転子、光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、

第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、

該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設定する

ことを特徴とする可変ファラデー回転子。

【請求項 2】 請求項 1 記載の可変ファラデー回転子において、

該可変ファラデー回転子の回転角を制御する上記第二の磁界を生成する電磁石のコイルに、

直列抵抗を有する、出力電圧に温度係数のない電圧源、

又は、並列抵抗を有する、出力電流に温度係数のない電流源のいずれかによって電流を供給する

ことを特徴とする可変ファラデー回転子。

【請求項 3】 請求項 2 記載の可変ファラデー回転子を、

複屈折結晶から成る偏光子と複屈折結晶から成る検光子の間に挿入して光を透過させる

ことを特徴とする光可変減衰器。

【請求項 4】 請求項 3 記載の光可変減衰器を構成する上記電磁石のコイルに供給する電流を、

該光可変減衰器の減衰量を最小にする電流値と該光可変減衰器の減衰量を最大にする電流値との間でスイッチする

ことを特徴とする光シャッタ。

【請求項 5】 偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、

偏光面一致制御素子によって偏光分離された 2 条の光の偏光を一致させ、

第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた 2 条の光の偏光角に所定の

ファラデー回転を与え、

透過率波長特性可変素子によって該ファラデー回転に対応する透過率の波長特性を与え、

第二のファラデー回転子において該第一のファラデー回転子によって与えられた偏光角のファラデー回転とは逆で絶対値が等しい偏光角のファラデー回転を与え、

該透過率波長特性可変素子において生ずる P 偏光と S 偏光の位相差を位相差制御素子によって補償し、

偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成する
光可変等化器において、

該第一のファラデー回転子および該第二のファラデー回転子に請求項 2 記載の可変ファラデー回転子を適用することを特徴とする光可変等化器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、広く光機能デバイスに適用される可変ファラデー回転子と該可変ファラデー回転子を適用する光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器に係り、特に、ファラデー回転角の温度特性が良好な可変ファラデー回転子と該可変ファラデー回転子を適用する結果温度特性が良好な光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器に関する。

【0002】

光ファイバ通信方式が実用化されてから久しいが、この間、電気信号を光信号に変換する電気-光変換素子、特に、レーザ・ダイオードの高速化と、光ファイバ自体の広帯域化が進められ、伝送速度が 10Gb/s （ギガ・ビット/秒：ギガは 10^9 を意味する単位である。）の光ファイバ通信方式が国内外で実用化されている。そして、一時は、 10Gb/s の光ファイバ通信方式を中心とする光ファイバ・ネットワークによって、十分な伝送容量のデジタル・ネットワークが敷設されたと考え得る状況に近づいていた。

【0003】

しかし、音声、データ及び画像を一括して扱うマルチメディア通信の普及、なかなかずく、コンピュータ・ネットワークを介してマルチメディア通信を行なうインターネットの急激ともいえる普及に遭遇して、一転してデジタル・ネットワークを構成する光ファイバ通信方式の伝送容量を即座に増やす必要に迫られるようになった。

【 0 0 0 4 】

光ファイバ通信方式の伝送容量を増やすには、新規に光ファイバ・ネットワークを敷設するというやり方もあるが、そのためにはスペース、物、金、人及びエネルギーというベーシック・リソースと時間が必要になり、特に、時間がかかるということから、インターネットの急速な普及に即応することは到底困難である。

【 0 0 0 5 】

このような状況に鑑み、既設の光ファイバ・ネットワークを使用し、基本的には既に実用化されている電気・光変換技術及び光・電気変換技術を適用して、光ファイバ通信方式の伝送容量を大幅に増やすことができる波長分割多重光通信方式（Wavelength Division Multiplexingの頭文字により「WDM光通信方式」と呼ばれることが多い。）が再び注目を浴びるようになって開発活動が活発になってきた。

【 0 0 0 6 】

ここで、「再び」というのは、昭和50年代に波長分割多重光通信方式が活発に研究され、一部システムへの適用が図られたが基幹通信方式への適用は少なく、一時研究開発が停滞気味になっていたのを、最近の上記背景によって活発に開発活動が行なわれるようになったという意味である。

一方、1980年代中頃までは、光ファイバ通信方式における中継方式は光信号を電気変換して伝送データを再生、増幅して光信号に再変換するという方式であった。この方式は、波形の再生を行なうので種々の歪み要因による波形劣化が累積されないという利点を有する反面、電気雑音に強い筈の光ファイバ通信方式において電気雑音を混入させる原因ともなりかねず、又、中継器の構成が複雑で光通信システムのコストを低減させることが困難であるため、長い間、光信号の

まま増幅、中継できる増幅方式の実現が望まれていた。

【 0 0 0 7 】

そして、1980年代の中頃に、コアに稀土類元素のイオンを添加した低損失光ファイバと、光ファイバに添加されている稀土類元素イオンを励起するための高出力レーザ・ダイオードとが実現されると、急速に稀土類元素添加光ファイバを用いた光ファイバ増幅器の実用化が進められるようになり、今や、光ファイバ通信方式における出力増幅器及び中継器にはコアに稀土類元素のイオンを添加した光ファイバ増幅器が使用されるようになっている。

【 0 0 0 8 】

さて、光ファイバ増幅器を構成する増幅ファイバのコアに添加される稀土類元素の典型的な例はエルビウムである。エルビウム添加光ファイバ増幅器の増幅メカニズムの詳細は省略するが、エルビウム添加光ファイバ増幅器は増幅可能な入力光信号の波長の範囲が広いのが特徴である。逆に、増幅可能な波長の範囲が広いがために、エルビウム添加光ファイバ増幅器の利得は無視しえない波長特性を持っている。

【 0 0 0 9 】

このため、エルビウム添加光ファイバ増幅器を使用する時には利得の波長特性を等化する必要がある。しかも、該波長特性は励起レーザ・ダイオードのパワーや入力光信号のレベルなどによって変わるので、これらを条件に応じてアダプティブに等化することが可能な光可変等化器が必要である。

このほか、光ファイバ通信方式においてはレベル・ダイアグラムを適正に設定するために、光信号のレベルを可変に制御する光可変減衰器が重要なデバイスである。

【 0 0 1 0 】

又、光ファイバ通信方式における光パワーが大きくなっている中でコネクタ外れなどによる人体への損傷を防止するために、コネクタ外れを検出したら送信光出力をシャット・ダウンする必要性があるが、シャット・ダウンのための素子として光シャッタが広く使用されている。

光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器などの光機能デバイスにおいては

、透過光の偏光面を磁界によって回転（この回転をファラデー回転、回転角をファラデー回転角という。）させる性質を有する磁気光学結晶を使用した可変ファラデー回転子が組み込まれており、ファラデー回転角によって実質的に光の透過率を制御している。

【0011】

さて、可変ファラデー回転子のファラデー回転角は温度特性を持っており、光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器の温度に対する安定性を阻害する原因になっている。従って、光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器の温度に対する安定性を改善するためには可変ファラデー回転子の温度特性を改善する必要がある。

【0012】

【従来の技術】

図25は、可変ファラデー回転子の基本構成である。

図25において、3は可変ファラデー回転子で、イットリウム鉄ガーネット（所謂YIGである。以降、これをガーネット単結晶と記載する。）などの磁気光学結晶よりなるファラデー素子3-1、可変磁界をファラデー素子3-1に印加する電磁石3-2及び一定磁界をファラデー素子3-1に印加する一対の永久磁石3-3によって構成される。

【0013】

ここで、永久磁石3-3による磁界の方向を入力光の光軸の方向に一致させ、永久磁石3-3による磁界の方向に対して垂直な方向に電磁石3-2によって可変磁界を印加している。そして、永久磁石3-3がファラデー素子3-1に印加する一定磁界の強度はファラデー素子3-1の磁化を飽和させるに足る磁界強度に設定する。

【0014】

永久磁石3-3による磁界によってファラデー素子3-1の磁化は飽和しているので、永久磁石3-3による磁界と電磁石3-2による磁界の合成磁界の強度は永久磁石3-3による磁界強度と等しく、電磁石3-2による磁界強度に応じて合成磁界の方向が変化するため、ファラデー素子の磁化の方向も変化する。従

って、ファラデー素子の磁化の光軸方向の成分は電磁石 3 - 2 による磁界強度に応じて変化し、これによって入力光に与えるファラデー回転角を制御できるようになっている。

【 0 0 1 5 】

そして、ファラデー素子 3 - 1 として使用される代表的な磁気光学結晶であるガーネット単結晶には、最近では液相エピタキシャル法によって形成したビスマス置換稀土類鉄ガーネット単結晶膜が用いられるようになっている。これは、ビスマス置換稀土類鉄ガーネット単結晶膜がビスマスの寄与によって通常のガーネット単結晶に比較してファラデー回転係数が大きいという利点を有することによる。ただ、通常のガーネット単結晶やビスマス置換稀土類鉄ガーネット単結晶膜のいずれにしても、ファラデー回転角の温度依存性が大きいという共通の欠点がある。

【 0 0 1 6 】

この温度特性を改善するために、ファラデー素子のファラデー回転自体の温度特性と、一定磁界と可変磁界の合成磁界による磁化のしやすさの方位による違い（磁気異方性）の温度特性を相殺させてファラデー素子のファラデー回転角の温度特性を抑圧する技術が開発されている。上記技術について以下に説明する。

図 2 6 は、例えばガーネット単結晶の (1 1 1) 面を中心としたステレオ投影図である。

【 0 0 1 7 】

図 2 6 に示すステレオ投影図において、中心は (1 1 1) 面で、隣合う同心円は互いに 1 0 度ずつ異なる面を表わし、隣合う径方向の直線は互いに 1 0 度ずつ異なる面を表わしている。従って、ガーネット単結晶の任意の面はステレオ投影図内の点として示すことができる。

ところで、ガーネット単結晶は磁気異方性は、(1 1 1) 方位と対称等価な方位が磁化容易軸であり、(1 0 0) 方位と対称等価な方位が磁化困難軸である。そして、磁気異方性の大きさは低温ほど大きく、且つ、特定のファラデー回転角において影響が大きい。

【 0 0 1 8 】



ガーネット単結晶には、図 2 6 の紙面の裏側から表側の方向に永久磁石による飽和磁界を印加するものとして、電磁石によって印加する磁界の方向を変えてファラデー回転の様子を見ると下記のようなになる。

まず、図 2 6 において、 $(1\ 1\ 1)$ 方位から $(-1\ -1\ 2)$ 方位（数字の上にバーを記載するのが正規の記載方法であるが、明細書において上記記載ができないためにバーを“-”符号で表わしている。これは、図 2 6 には限らない。）に電磁石による磁界を印加する場合には、 $(1\ 1\ 1)$ 面から 55 度に磁化困難軸 $(0\ 0\ 1)$ がある（図では、同心円と径を示す直線を避けて示すために「a」と記載している。）。

【0 0 1 9】

従って、ガーネット単結晶の磁化の方向は、磁化容易軸の $(1\ 1\ 1)$ 方位と $(-1\ -1\ 2)$ 方位に向き易く、磁化困難軸の $(0\ 0\ 1)$ 方位 a には向き難く、この磁気異方性の影響でファラデー回転角に温度特性が生ずる。

又、 $(1\ 1\ 1)$ 方位から $(-2\ 1\ 1)$ 方位に電磁石による磁界を印加する場合には、 $(1\ 1\ 1)$ 方位から 70 度の方位に磁化容易軸 $(-1\ 1\ 1)$ b がある。従って、この方位に磁界を印加する場合にも磁気異方性の影響でファラデー回転角に温度特性が生ずる。

【0 0 2 0】

そして、ファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性は、先にも記載した如く、ファラデー回転角自体の温度特性と磁気異方性の温度特性の和によって与えられる。磁気異方性の影響はファラデー素子の設置の仕方により磁気異方性の温度係数とファラデー素子自体の温度係数の符号を逆にすることができるため、互いにキャンセルすることが可能である。こうして温度特性を改善したファラデー素子が得られている。

【0 0 2 1】

図 2 9 は、光可変減衰器の構成と減衰量の制御を説明する図である。

図 2 9 において、10 は、入力光信号を光可変減衰器に導く入力光ファイバである。

9 は、該入力光信号を平行光にするコリメート系で、入力光ファイバ 10 を接

着固定するフェルール 9-1、入力光ファイバから出射される光を平行光にする
コリメート・レンズ 9-3、コリメート・レンズ 9-3 が固着されるレンズ・ホル
ダ 9-2 を有して構成される。

【 0 0 2 2 】

ここで、コリメート・レンズ 9-3 が固着されるレンズ・ホルダ 9-2 は、入
力光ファイバ 10 とコリメート・レンズ 9-3 の距離をコリメート・レンズ 9-
3 の焦点距離に調整した後に、フェルール 9-1 と溶接固定される。

尚、コリメート系の構造については本発明の本質ではないために概要のみを示
すことにする。

【 0 0 2 3 】

11 は、例えばルチルなどの楔型の複屈折結晶より成る偏光子で、入力光を偏
光方向が互いに垂直な常光 O と異常光 E とに分離する。

3 は、ファラデー回転子で、先にも記載したように、磁気光学結晶よりなるフ
アラデー素子 3-1、可変磁界をファラデー素子 3-1 に印加する電磁石 3-2
及び一定磁界をファラデー素子 3-1 に印加する一対の永久磁石（図 26 の煩雑
化をさけるために一対の永久磁石は図示していない。可変ファラデー回転子の正
確な構成については図 25 を参照されたい。）によって構成される。そして、電
磁石 3-2 による磁界によって光の進行方向の磁界強度を変化させて常光 O と異
常光 E に対するファラデー回転角を変化させる。

【 0 0 2 4 】

12 は、例えばルチルなどの楔型の複屈折結晶より成る検光子で、常光 O を更
に常光 O O と異常光 O E に分離し、異常光 E を更に常光 E O と異常光 E E に分離
する。

9a は、検光子 12 から出射される光を出力光ファイバに結合するコリメート
系で、フェルール 9-1a、コリメート・レンズ 9-3a、コリメート・レンズ
9-3a が固着されるレンズ・ホルダ 9-2a を有して構成される。

【 0 0 2 5 】

10a は、利得等化器の出力光ファイバである。

そして、出力光ファイバ 10a とフェルール 9-1a の関係、コリメート・レ

レンズ 9-3 a を固着したレンズ・ホルダ 9-2 a とフェルール 9-1 a の関係はコリメート系 9 と同じである。

例えば、偏光子 1 1 と検光子 1 2 を構成する複屈折結晶の光学軸が互いに垂直になるように配置した場合、図 2 9 の光可変減衰器は下記のように動作する。

【 0 0 2 6 】

入力光ファイバ 1 0 から出射してコリメート・レンズ 9-3 で平行光になった入力光は偏光子 1 1 によって常光 O と異常光 E に分離される。ここで、常光 O と異常光 E の偏光方向は互いに直交している。

常光 O と異常光 E はファラデー回転子 3 を通過する際に合成磁界の光の進行方向に平行な磁界強度に応じて偏光方向が回転して出射される。

【 0 0 2 7 】

偏光方向を回転させられた常光 O は検光子 1 2 において更に常光 O O と異常光 O E に分離され、偏光方向を回転させられた異常光 E は検光子 1 2 において更に常光 E O と異常光 E E に分離される。

そして、検光子 1 2 から出射される常光 O O と異常光 E E は互いに平行で、コリメート・レンズ 9-3 a によって出力光ファイバ 1 0 a のコアに結合されるが、検光子 1 2 から出射される常光 E O と異常光 O E は平行にはならず広がるためにコリメート・レンズ 9-3 a を通っても出力光ファイバ 1 0 a のコアには結合されにくい。

【 0 0 2 8 】

ファラデー回転子 3 の電磁石 3-2 による磁界強度が 0 の時、ファラデー素子 3-1 のファラデー回転角は 90 度であり、ファラデー回転子 3 から出射された常光 O は検光子 1 2 からは全て常光 O O として出射され、ファラデー回転子 3 から出射された異常光 E は検光子 1 2 からは全て異常光 E E として出射されるので、この場合には入力光は全て出力光ファイバ 1 0 a のコアに結合されて、理想的には損失が 0 である。

【 0 0 2 9 】

一方、ファラデー回転子 3 の電磁石 3-2 による磁界強度が十分に大きい時、ファラデー素子 3-1 のファラデー回転角は 0 度に近づき、ファラデー回転子 3

から出射された常光 O は検光子 1 2 からは異常光 O E として出射され、ファラデー回転子 3 から出射された異常光 E は検光子 1 2 からは常光 E O として出射されるので、この場合には入力光は出力光ファイバ 1 0 a のコアに結合されにくく、損失が最大になる。ファラデー回転角が 0 度と 9 0 度の中間の場合には損失は中間的な値になる。

【 0 0 3 0 】

上記の如く、ファラデー回転子 3 の電磁石 3 - 2 による磁界の強度によってファラデー素子 3 - 1 によるファラデー回転角が 9 0 度から 0 度の範囲で変化し、ファラデー回転角に応じて出力光ファイバ 1 0 a のコアに結合する光量が変わるために、図 2 9 の構成によって光可変減衰器を実現することができる。

又、光シャッタは光可変減衰器を応用したものである。即ち、図 2 9 の如く光可変減衰器を構成し、電磁石の電流を光可変減衰器の減衰量が最低になる電流と減衰量が最大になる電流の間でスイッチングすれば、最小の減衰量と最大の減衰量とを切り替えることができるので光シャッタが得られる。そして、通常は最大減衰量と最初減衰量との差を 3 0 d B 程度にすることができる光可変減衰器を光シャッタとして用いる。

【 0 0 3 1 】

図 3 2 は、光可変等化器の構成と動作を説明する図である。

1 0 は、入力光信号を利得等化器に導く入力光ファイバである。

9 は、該入力光信号を平行光にするコリメート系で、入力光ファイバ 1 0 を接着固定するフェルール 9 - 1、入力光ファイバから出射される光を平行光にするコリメート・レンズ 9 - 3、コリメート・レンズ 9 - 3 が固着されるレンズ・ホルダ 9 - 2 を有して構成される。

【 0 0 3 2 】

1 は、直線偏光、円偏光、楕円偏光などの任意の偏光状態で入射される入力光信号の偏光を分離する偏光分離素子で、代表的な偏光分離素子としては平行ルチル板がある。

偏光分離素子 1 が紙面に平行な結晶軸 X 1 を有する場合、任意の偏光状態の入力光信号が偏光分離素子 1 に入射されると、該結晶軸 X 1 を含む面に対して任意

偏光の振動方向が垂直な常光と、結晶軸 X 1 を含む面に対して任意偏光の振動方向が平行な異常光に分離される。

【 0 0 3 3 】

ここで、常光は偏光分離素子 1 の入射面において屈折することなく直進し、入射面と平行な出射面においても屈折することなく直進する。一方、異常光は偏光分離素子 1 の入射面で屈折してから直進し、入射面と平行な出射面において再び屈折してから入射光と平行な方向に出射する。従って、任意偏光の光を偏光分離素子 1 に入射することによって、平行な常光と異常光を得ることができる。

【 0 0 3 4 】

2 は、偏光分離素子で偏光分離された常光と異常光の振動方向を同一にする偏光面一致制御素子で、所謂 $1/2$ 波長板である。ここで、偏光面一致制御素子は常光側、異常光側のいずれかに挿入すればよいが、図 3 2 では、偏光面一致制御素子を常光側に挿入する例を図示している。

さて、所謂波長板中に直交する 2 つの偏光成分を持つ光が入射されると、該波長板の厚さによって 2 つの偏光間の相対位相を変化させることができる。このうち、 $1/2$ 波長板は、2 つの偏光間の相対位相を $1/2$ 波長変化させるものである。一方の偏光を基準にしてもう一方の偏光の位相が $1/2$ 波長シフトするから、 $1/2$ 波長板を通さない場合に比較して、2 つの偏光を合成した光の振動方向は 90 度回転する。

【 0 0 3 5 】

上記作用によって、偏光分離素子 1 が出射する常光を $1/2$ 波長板に通せば、偏光分離素子が出射する異常光と同一の偏光面の光を得ることができ、偏光分離素子 1 が出射する異常光を $1/2$ 波長板に通せば常光と同じ偏光面の光を得ることができる。従って、偏光面一致制御素子 2 は常光側、異常光側のいずれかに挿入すればよい。

【 0 0 3 6 】

3 は、偏光分離素子 1 が出射する異常光と、偏光分離素子 1 が出射する常光の偏光を該異常光の偏光と一致させられた光の偏光角を可変に制御するファラデー回転子で、磁界によって光の偏光角を回転させる磁気光学結晶を用いたファラデー

ー素子 3-1 と、ファラデー素子 3-1 に磁界をかける電磁石 3-2 及びファラデー素子に磁界をかける永久磁石によって構成される。尚、図面の煩雑化をさけるために図 3 2 においては永久磁石は図示を省略しているが、正確な構成は図 2 5 を参照されたい。

【 0 0 3 7 】

そして、該永久磁石で図 3 2 のファラデー素子 3-1 中に示されている光の進行方向に平行な飽和磁界 H 1 を形成し、電磁石 3-2 で図 3 2 のファラデー素子 3-1 中に示されている光の進行方向に垂直な磁界 H 2 を形成する。

上記状態で電磁石 3-2 によって該永久磁石の磁界 H 1 と垂直方向の磁界 H 2 をかけると、合成磁界の方向は磁界 H 1 と磁界 H 2 によって形成される矩形の対角線方向になる。しかし、ファラデー素子 3-1 の飽和磁界強度は磁界の方向にはよらず一定であるので、合成磁界強度は該永久磁石の磁界 H 1 の強度に等しくなる。従って、合成磁界の磁界 H 1 方向の成分は、該永久磁石で与えられている飽和磁界 H 1 より小さくなる。

【 0 0 3 8 】

ところで、ファラデー素子中における偏光の回転角は光の進行方向の磁界強度によって決まる。上記の如く、磁界 H 2 をかけることによって実際の合成磁界強度の磁界 H 1 方向の成分は飽和磁界 H 1 より小さくなるので、偏光の回転角が変化する。

磁界 H 2 は、電磁石 3-2 のコイルに流す電流によって制御されるので、偏光の回転角も電磁石 3-2 のコイルに流す電流によって制御される。

【 0 0 3 9 】

4 は、透過率波長特性可変素子で、ガラスなどの透明物質による基板 4-1 と、基板 4-1 上に異なる屈折率を有する誘電体薄膜を多層に形成した多層誘電体薄膜 4-2 によって構成される。

異なる屈折率を有する誘電体薄膜の代表的なものとしては、二酸化シリコン (SiO_2)、二酸化チタン (TiO_2) がある。因みに、二酸化チタンの方が二酸化チタンより屈折率が高い。

【 0 0 4 0 】

多層誘電体薄膜 4 - 2 に光が入射される場合、その P 偏光成分と S 偏光成分の大きさ、つまり、偏光角によって多層誘電体薄膜における光の透過率が異なる。従って、偏光角によって光の透過率即ち光に対する利得又は損失が異なることになる。

ここで、P 偏光と S 偏光について若干説明をしておく必要がある。

【 0 0 4 1 】

さきの常光と異常光は、平行ルチル板の結晶軸 X 1 を含む平面を基準にして、該平面に垂直な方向に振動する光を常光、該平面に平行な方向に振動する光を異常光と定義したが、P 偏光と S 偏光は多層誘電体薄膜 4 - 2 の面を基準に定義される。

即ち、光の進行方向（光軸）を含むように多層誘電体薄膜 4 - 2 の表面に垂直に立てた面に平行な偏光を P 偏光、光軸を含むように多層誘電体薄膜 4 - 2 の表面に垂直に立てた面に垂直な偏光を S 偏光と定義する。

【 0 0 4 2 】

そして、多層誘電体薄膜 4 - 2 中の透過率は、P 偏光と S 偏光では異なり、且つ、P 偏光の透過率も S 偏光の透過率も広い波長領域においてかなり顕著な波長特性を持っている。つまり、偏光分離素子 1 が出射する光と、偏光面一致制御素子 2 によって偏光分離素子 1 が出射する光と同一偏光にさせられた光の偏光角をファラデー回転子 3 によって可変に制御することによって、多層誘電体薄膜 4 - 2 に対する P 偏光と S 偏光の成分を可変に制御することができ、これによって多層誘電体薄膜 4 - 2 中における光の透過率を可変に制御できるのである。

【 0 0 4 3 】

3 a は、偏光分離素子 1 が出射する異常光と、偏光分離素子が出射する常光の偏光を該異常光の偏光と一致させられた光の偏光角をファラデー回転子 3 が回転したのとは反対に同じ偏光角だけ回転させるファラデー回転子で、ファラデー素子を用いたファラデー素子 3 - 1 a 及びファラデー素子 3 - 1 a に磁界をかける電磁石 3 - 2 a と、図示を省略している永久磁石によって構成される。

【 0 0 4 4 】

そして、該永久磁石によって図 3 2 のファラデー素子 3 - 1 中に示されている

光の進行方向に平行な磁界 H_1 とは反対方向で、磁界強度は磁界 H_1 と等しい磁界 H_{1r} を形成し、電磁石 3-2 によって図 3 2 のファラデー素子 3-1 中に示されている磁界 H_2 とは反対方向で、磁界強度は磁界 H_2 と等しい磁界 H_{2r} を形成する。

【 0 0 4 5 】

この状態で電磁石 3-2 a によって磁界 H_{1r} と垂直方向の磁界 H_{2r} をかけると、合成磁界の方向は磁界 H_{1r} と磁界 H_{2r} によって形成される矩形の対角線の方向になる。

しかし、ファラデー素子の飽和磁界強度は磁界の方向にはよらず一定であるので、実際の合成磁界強度は該対角線の長さに相当する磁界強度より小さく、磁界 H_{1r} の強度に等しくなる。従って、合成磁界の磁界 H_{1r} 方向の成分は、永久磁石で与えられている飽和磁界 H_{1r} より小さくなる。

【 0 0 4 6 】

ところで、ファラデー素子中における偏光の回転角は光の進行方向の磁界強度によって決まる。上記の如く、磁界 H_{2r} をかけることによって実際の合成磁界強度の磁界 H_{1r} 方向の成分は飽和磁界 H_{1r} より小さくなって偏光の回転角が変化する。

上記によって明らかなように、ファラデー回転子 3 a において磁界 H_{2r} をかけることによって生ずる光の進行方向の磁界強度の変化は、ファラデー回転子 3 において磁界 H_2 をかけることによって生ずる光の進行方向の磁界強度の変化とは逆方向に生ずる。

【 0 0 4 7 】

従って、ファラデー回転子 3 a によって、ファラデー回転子 3 において 2 条の光に与えられた偏光の回転とは反対方向で、同一の回転角だけ偏光を回転でき、ファラデー素子の入射光の偏光状態に戻すことができる。

5 は、偏光面復帰素子で、偏光面一致制御素子 2 と同一のものである。

ただ、図 3 2 の例では、偏光面一致制御素子 2 によって、偏光分離素子 1 が出射する常光の偏光を異常光の偏光に一致させているので、偏光面復帰素子 5 は偏光分離素子が出射する異常光側に挿入して、偏光面復帰素子 5 を通る光と偏光面

復帰素子 5 を通らない光の偏光が 90 度異なるようにしている。

【 0 0 4 8 】

尚、単純に偏光面復帰素子 5 を通る光と偏光面復帰素子 5 を通らない光の偏光が 90 度異なるようにするのであれば、偏光面復帰素子 5 を偏光分離素子 1 が出射する常光側に挿入してもよいが、2 条の光の偏波モード分散を同一にする、即ち、2 条の光に対する光路長を一致させるために、偏光分離素子 1 の出射側で偏光面一致制御素子 2 を挿入しなかった光の方に偏光面復帰素子 5 を挿入することが好ましい。

【 0 0 4 9 】

6 は、透過率波長特性可変素子 4 における P 偏光と S 偏光の位相差を補償する位相差制御素子である。

7 は、偏光合成素子で、偏光分離素子 1 と同一のものである。

偏光合成素子 7 中では、偏光面復帰素子 5 から入射される、偏光合成素子 7 の常光と同じ偏光の光は直進し、偏光面復帰素子 5 を通らずに入射される、偏光合成素子 7 の異常光と同じ偏光の光は屈折してから直進するので、偏光合成素子 7 と偏光分離素子 1 が同一材質で同一寸法であれば、偏光合成素子 7 の常光と同じ偏光の光と偏光合成素子 7 の異常光と同じ偏光の光は、偏光合成素子 7 の入射面と反対側の面において同一の点に到達する。つまり、偏光分離素子 1 で偏光分離された光が偏光合成素子 7 で元の偏光状態に合成される。

【 0 0 5 0 】

ここで、位相差制御素子 6 を適用するのは、透過率波長特性可変素子 4 中では P 偏光と S 偏光との間に無視しえない位相差が生ずることが多く、偏光面復帰素子 5 において 2 条の光の一方の偏光を 90 度回転させただけでは、異常光が混入した常光と常光が混入した異常光が出射されるので、これをそのまま偏光合成すると損失が生ずる上に該損失に波長依存性が生ずるのを避けるためである。尚、位相差制御素子 6 の挿入位置は図 3 2 の位置には限定されない。

【 0 0 5 1 】

9 a は、偏光合成素子 7 から出射される平行光を出力光ファイバに結合するコリメート系で、フェルール 9-1 a、コリメート・レンズ 9-3 a、コリメート

・ レンズ 9 - 3 a が固着されるレンズ・ホルダ 9 - 2 a を有して構成される。

1 0 a は、光可変等化器の出力光ファイバである。

即ち、偏光分離素子 1 によって常光と異常光に分離し、偏光面一致制御素子 2 において該常光と該異常光の偏光面を一致させてからファラデー回転子 3 によって偏光を回転させて透過率波長特性可変素子 4 に供給し、透過率波長特性可変素子 4 から出射される 2 条の光の位相差を補償し、光の偏光状態を元に戻した上で、常光と異常光を合成する。

【 0 0 5 2 】

そして、偏光分離素子 1 によって常光と異常光に分離するのは、透過率波長特性可変素子 4 における P 偏光、S 偏光との関係を規定して、透過率波長特性の基準を定めるためである。もし、偏光分離素子 1 を使用しないで、透過率波長特性可変素子 4 に入力光信号を入射すれば、入射光の偏光と透過率波長特性可変素子 4 における P 偏光、S 偏光との関係が不明なために透過率の波長特性の制御が困難になるし、入射光の偏波が変わると透過率の波長特性の制御が不可能になるからである。

【 0 0 5 3 】

又、透過率波長特性可変素子 4 における P 偏光と S 偏光の位相差を補償するので、透過率波長特性可変素子 4 の透過率の波長特性は光ファイバ増幅器の利得偏差と逆の特性になる。

しかも、図 3 2 の構成の光可変等化器は、透過率波長特性可変素子 4 によって光可変等化器の透過率を可変に制御できるという特徴を持っている。これにより、光ファイバ増幅器の入力レベルが変動したり、励起レーザ・ダイオードの出力パワーの変動によって光ファイバ増幅器の利得が変動することがあっても、これらをアダプティブに等化する光可変等化器が得られる。

【 0 0 5 4 】

【発明が解決しようとする課題】

ガーネット単結晶やビスマス置換稀土類鉄ガーネット単結晶膜より成るファラデー素子のファラデー回転角の温度特性を改善するための、ファラデー回転自体の温度特性と磁気異方性の温度特性を相殺させてファラデー素子のファラデー回

転角の温度特性を抑圧する技術には下記の問題がある。

【 0 0 5 5 】

即ち、ファラデー素子のファラデー回転角自体の温度係数はファラデー回転角に依存せずほぼ一定であるのに対して、磁気異方性の温度特性は特定のファラデー回転角近傍に限定された狭い方位だけで影響を及ぼす。

従って、特定のファラデー回転角ではファラデー素子の温度特性を小さくすることが可能であるが、広い範囲のファラデー回転角にわたって温度特性を改善することができない。

【 0 0 5 6 】

図 2 7 は、従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性、図 2 8 は、従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動である。

ファラデー素子を光可変減衰器や光可変等化器に適用する場合、ファラデー回転角 4 0 度程度以下における温度特性が良好なことが必要であるが、図 2 7 に示す如く、温度範囲 0℃ から 6 5℃ においてファラデー回転角 4 0 度程度でもファラデー回転角に温度特性があることが見えている。これを図 2 8 で拡大して見ると、ファラデー回転子を構成する電磁石の駆動電流の値が 2 0 m A から 1 0 0 m A の範囲で、1. 5 度程度の温度変動があることが判るが、これは、ファラデー素子を光可変減衰器や光可変等化器に適用する場合に許容しがたい温度変動である。

【 0 0 5 7 】

図 3 0 は、従来のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動である。尚、温度範囲は 0℃ から 6 5℃ である。

図 3 0 に示す如く、ファラデー回転子を構成する電磁石の駆動電流の値が 0 m A から 1 0 0 m A の範囲で、3 d B 程度の変動がある。光通信装置における光レベルの設定に当たって 3 d B の温度変動は許容できるものではない。

【 0 0 5 8 】

図 3 1 は、従来のファラデー素子を適用した光シャッタの温度特性である。

図 3 1 に示す如く、電磁石に流す電流に対する減衰特性が減衰量が大きいところで非常に大きな温度特性を有している。例えば 2 5℃ で減衰量 4 0 d B 以上が

得られていても、温度が0℃又は65℃になると減衰量が30dB程度まで低下する。もし0℃又は65℃において初期調整をした場合には温度変動に伴う減衰量の変化はもっと大きくなる。

【0059】

このため、従来のファラデー回転子を適用した光シャッタにおいては減衰量を検出した情報又は温度を検出した情報によってシャット・ダウンの電流値を変動させて、シャット・ダウンの減衰量を一定に保つという制御技術を適用する必要性が生ずる。

しかし、図31に示した減衰量のピーク近傍で減衰量のフィード・バック制御を行なおうとすると、該ピークの前後で減衰量のスロープの符号が変わるために通常のフィード・バック制御では制御が困難になる。そこで、予め温度特性を測定した結果をメモリに格納しておき、光シャッタの周囲温度を検出した結果によって適切な電流値を該メモリから読み出すというフィード・フォワード制御を行なって減衰量の温度特性を補償している。

【0060】

いずれにしても、ファラデー素子の温度特性のために、光シャッタに上記の如き制御回路を付加する必要性が生じて、光シャッタのコストを引き上げる原因になっている。

図33は、従来のファラデー回転子を適用した光可変等化器の温度特性と等化度温度偏差である。

【0061】

図33の等化度温度偏差のデータより明らかなように、従来のファラデー回転子を適用した光可変等化器の等化度温度偏差は、入力光の波長1520nmから1560nm強において0.7dBにも達している。波長多重光通信システムをはじめとする光通信システムにおいてn段（nは正の整数）の中継が行なわれるものとし、各々の中継器の特性はランダムであると仮定すると、1段で0.7dBの等化度偏差が生ずるとn段では $n^{1/2} \times 0.7$ dBの等化度偏差が生ずる計算（例えば、10段で約2dB、100段で7dB）になるので、この特性の光可変等化器を波長多重光通信システムに適用することは困難である。

【 0 0 6 2 】

本発明は、かかる問題点に鑑み、ファラデー回転角の温度特性が良好な可変ファラデー回転子と該可変ファラデー回転子を適用する結果温度特性が良好な光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器を提供することを目的とする。

【 0 0 6 3 】

【課題を解決するための手段】

第一の発明は、ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設定する可変ファラデー回転子の技術である。

【 0 0 6 4 】

第一の発明によれば、ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設定する。従って、ファラデー回転角の制御を行なう第二の磁界の方向には磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸が存在しないので、該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度依存性は磁気異方性の影響を受けなくなり、該磁気光学結晶自体の温度依存性で決まるようになって、広いファラデー回転角にわたって一定となる。このため、該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度依存性をキャンセルすることが容易になる。

【 0 0 6 5 】

第二の発明は、第一の発明の可変ファラデー回転子において、該可変ファラデー回転子の回転角を制御する上記第二の磁界を生成する電磁石のコイルに、直列抵抗を有する、出力電圧に温度係数のない電圧源、又は、並列抵抗を有する、出力電流に温度係数のない電流源のいずれかによって電流を供給することを特徴とする可変ファラデー回転子の技術である。

【 0 0 6 6 】

第二の発明によれば、第一の発明の可変ファラデー回転子において、該可変ファラデー回転子の回転角を制御する上記第二の磁界を生成する電磁石のコイルに

、直列抵抗を有する、出力電圧に温度係数のない電圧源、又は、並列抵抗を有する、出力電流に温度係数のない電流源のいずれかによって電流を供給するので、該コイルに流れる電流値が該電圧源の直列抵抗又は該電流源の並列抵抗の温度係数に従って変化してファラデー回転角を温度変動に伴って変化させる。一方、第一の発明のファラデー回転子に適用する磁気光学結晶はほぼ一定な温度係数に従うファラデー回転角の温度特性を有している。従って、該電圧源の直列抵抗又は該点電流源の並列抵抗及び電磁石のコイルの抵抗との関係によって該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度特性を抑圧可能で、温度特性が良好なファラデー回転子を得ることができる。

【 0 0 6 7 】

第三の発明は、第二の発明の可変ファラデー回転子を、複屈折結晶から成る偏光子と該複屈折結晶から成る検光子の間に挿入して光を透過させる光可変減衰器の技術である。

第三の発明によれば、該偏光子によって分離された常光 O と異常光 E とが該ファラデー回転子のファラデー回転角に応じて偏光を回転させられて該検光子に入射される。該検光子において該偏光子によって分離された常光 O が更に常光 OO と異常光 OE に分離され、該検光子において該偏光子によって分離された異常光 E が更に常光 EO と異常光 EE に分離されるが、光ファイバのコアに集光される常光 OO と異常光 EE の強度が該ファラデー回転子のファラデー回転角に応じて変化するので、上記構成によって光可変減衰器を構成することができる。その上、該ファラデー回転子の温度特性が改善されているので、光可変減衰器としての温度特性も改善される。

【 0 0 6 8 】

第四の発明は、第三の発明の光可変減衰器を構成する上記電磁石のコイルに供給する電流を、該光可変減衰器の減衰量を最小にする電流値と該光可変減衰器の減衰量を最大にする電流値との間でスイッチする光シャッタの技術である。

第四の発明によれば、上記光可変減衰器において、上記電磁石のコイルに供給する電流を、該光可変減衰器の減衰量を 0 にする電流値と該光可変減衰器の減衰量を最大にする電流値との間でスイッチするので光シャッタを構成することがで

き、且つ、温度特性が改善されたファラデー回転子を使用しているので、特別な制御をしなくてもシャット・ダウン時の減衰量を安定化することができる。

【 0 0 6 9 】

第五の発明は、偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、偏光面一致制御素子によって偏光分離された2条の光の偏光を一致させ、第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた2条の光の偏光角に所定の回転を与え、透過率波長特性可変素子によって該回転に対応する透過率の波長特性を与え、第二のファラデー回転子において該第一のファラデー回転子によって与えられた偏光角の回転とは逆で絶対値が等しい偏光角の回転を与え、該透過率波長特性可変素子において生ずるP偏光とS偏光の位相差を位相差制御素子によって補償し、偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成する光可変等化器において、該第一のファラデー回転子および該第二のファラデー回転子に第二の発明のファラデー回転子を適用する光可変等化器の技術である。

【 0 0 7 0 】

第五の発明によれば、偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、偏光面一致制御素子によって偏光分離された2条の光の偏光を一致させ、第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた2条の光の偏光角に所定の回転を与え、透過率波長特性可変素子によって該回転に対応する透過率の波長特性を与え、第二のファラデー回転子において該第一のファラデー回転子によって与えられた偏光角の回転とは逆で絶対値が等しい偏光角の回転を与え、偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成するので、光可変等化器を構成することができる。その上、第二の発明の温度特性を改善されたファラデー回転子を適用するので、光可変等化器としての温度特性も改善することができる。

【 0 0 7 1 】

【発明の実施の形態】

以降、図面を併用して本発明の技術の詳細を説明する。

本発明のファラデー回転子は、ファラデー回転子を構成するファラデー素子に印加する磁界の方向を永久磁石による磁界の方向から電磁石による磁界の方向へ回転させる時、磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸を通過せず、且つ、該

磁化容易軸及び該磁化困難軸が互いに対称に近くなる面内を回転させるものである。

【0072】

図1は、本発明の原理を説明するためのステレオ投影図で、図26と同様にガーネット単結晶の(111)面を中心としたステレオ投影図である。

先にも説明した如く、ガーネット単結晶は磁気異方性を有しており、(111)方位と対称等価な方位が磁化容易軸であり、(100)方位と対称等価な方位が磁化困難軸である。

【0073】

図1において、(111)方位から(-1-12)方位に電磁石による磁界を印加する場合には、(111)方位から55度に磁化困難軸(001) aがある。従って、ガーネット単結晶の磁化は、磁化容易軸の(111)方位と(-1-12)方位に向き易く、磁化困難軸の(001)方位 a には向き難く、この磁気異方性の影響でファラデー回転角に温度特性が生じ、又、(111)方位から(-211)方位に電磁石による磁界を印加する場合には、(111)方位から60度の方位に磁化容易軸(-111) bがある。従って、この方位に磁界を印加する場合にも磁気異方性の影響でファラデー回転角に温度特性が生ずる。

【0074】

尚、ガーネット単結晶には図1の紙面の裏側から表側の方向に永久磁石による飽和磁界を印加するものとして、電磁石による磁界の方向を変えてファラデー回転の様子を見ている。

一方、(-101)方位に電磁石による磁界を印加する場合には、この方位には時間困難軸も磁化容易軸も存在せず、且つ、最も近くにある磁化困難軸(001)方位 a と磁化容易軸(-111)方位 b がこの方位に関してほぼ対称に位置している。従って、(-101)方位に電磁石による磁界を印加する場合には、ガーネット単結晶のファラデー回転角の温度特性に磁気異方性の寄与が殆どなくなる。

【0075】

このため、ガーネット単結晶自体のファラデー回転角の温度特性だけによって

ファラデー回転子の温度特性が決定されるようになり、温度係数はほぼ一定な負の値になる。

そして、結晶の対称性から $(-1-12)$ 方位から 120 度に位置する $(-12-1)$ 方位と $(2-1-1)$ 方位に電磁石による磁界を印加してもファラデー回転の様子は同じになり、 (-211) 方位から 120 度に位置する $(11-2)$ 方位と $(1-21)$ 方位に電磁石による磁界を印加してもファラデー回転の様子は同じになる。

【0076】

従って、 (-101) 方位から 60 度に位置する (-110) 方位、 $(01-1)$ 方位、 $(10-1)$ 方位、 $(1-10)$ 方位及び $(0-11)$ 方位に電磁石による磁界を印加する場合にも磁気異方性の影響を受けない。そして、これらの方位は全て磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の方位の中間の方位であるといえることができる。

【0077】

図2は、本発明によるファラデー素子の例である。図2に示す例では、 (111) 方位に垂直な面と、 (-101) 方位に垂直な面と、 $(1-21)$ 方位に垂直な面で磁気光学結晶を切り出してファラデー素子を形成している。

そして、図1における (111) 面から光を入射して光軸の方向と同じ方向に永久磁石の磁界を印加し、 (-101) 面から電磁石の磁界を印加する例である。

【0078】

先にも記載した如く、 (111) 方位を中心にした場合には磁気光学結晶を切り出す方位は他にもある。これらは、全て磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の方位の中間の方位である。

上記の如く永久磁石と電磁石による磁界を設定した場合、低ファラデー回転角領域、即ち、 0 度から 40 度において、ファラデー素子のファラデー回転角の温度係数のファラデー回転角に対する変化量がファラデー回転角 1 度当たり -0.0025 (度/℃) 程度となって、ファラデー回転角の温度係数がファラデー回転角に殆ど依存しないファラデー素子を得ることができた。

【 0 0 7 9 】

即ち、従来の技術では磁気異方性の影響を積極的に利用してファラデー回転子としての温度特性を改善しているのに対して、本発明の特徴は、磁気異方性の影響をなくし、ファラデー素子のファラデー回転の温度特性だけを利用する点にある。これによって、ファラデー回転子の温度特性が広い範囲のファラデー回転角にわたって一定となるため、ファラデー素子自体のファラデー回転角の温度依存性を電磁石の電流の温度係数によってキャンセルすることが容易になる。

【 0 0 8 0 】

尚、上記では一定磁界を印加するのが永久磁石で可変磁界を印加するのが電磁石であると決めつけているが、一定磁界を電磁石で印加することも可能であるし、永久磁石の一定磁界を一部遮蔽することによって可変磁界とすることも可能である。従って、一般的には「ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設ける」というべきであろう。

【 0 0 8 1 】

図 3 は、光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その 1）である。

図 3 において、3-2 は電磁石で、コイル 3-2 1 及び磁芯 3-2 2 によって構成される。1 3 は出力電圧に温度係数がない電圧源である。

例えば、コイル 3-2 1 にエナメル被覆の銅線を用いて典型的な設計を行なうと、コイル 3-2 1 の電気抵抗は約 50Ω となり、該電気抵抗の温度係数は $+0.2 \Omega / ^\circ\text{C}$ 程度である。

【 0 0 8 2 】

即ち、コイル 3-2 1 の電気抵抗の温度係数が正であるため電磁石 3-2 のコイル 3-2 1 に供給される駆動電流の温度係数は負で、電磁石 3-2 による磁界強度の温度係数も負になる。従って、永久磁石と電磁石の合成磁界の光軸方向の磁界強度の温度係数は正になるので駆動回路の抵抗の温度係数によるファラデー回転角の温度係数は正になる。

【 0 0 8 3 】

一方、上記の如く電磁石による磁界を設定した場合、低ファラデー回転角領域、即ち、0度から40度において、ファラデー素子のファラデー回転角の温度係数の温度係数はファラデー回転角1度当たり -0.0025 （度/℃）程度となつて、ファラデー素子自体のファラデー回転角の温度係数は負である。

従つて、駆動回路の抵抗の温度係数によるファラデー回転角の正の温度係数によつてファラデー素子自体のファラデー回転角の負の温度係数をキャンセルすることができ、ファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性を改善できることになる。

【 0 0 8 4 】

尚、ファラデー素子のファラデー回転角の温度係数が正であることがあるならば、コイルには負の温度係数を有する抵抗体を適用すればよい。負の温度係数を有する抵抗体は薄膜技術によつて容易に得ることができるので、磁芯3-22に薄膜抵抗体を形成したセラミック筒をかぶせて、該薄膜抵抗体に電圧源によつて電流を供給すればよい。この技術は以降に述べる駆動回路においても適用することが可能である。

【 0 0 8 5 】

又、出力電圧に温度係数がない電圧源は、ダイオード又はサーミスタ等の温度特性を有する素子によつて該電圧源を構成するトランジスタの温度特性を補償するという手段によつて得られる。そして、このこと自体は当業者には容易に実現できる技術であるので、これ以上の説明は割愛する。

図4は、本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性（その1）で、図3の駆動回路を適用した場合の温度依存性である。

【 0 0 8 6 】

図4において、縦軸はファラデー回転角で単位は度（deg）、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルトVである。そして、温度25℃、0℃及び65℃について測定している。

図4に示す如く、ファラデー回転角が40度以下において、このスケールではファラデー回転角の温度特性は殆ど認められないことが判る。

【 0 0 8 7 】

図 5 は、本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動（その 1）であり、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値をプロットしたもので、図 3 の駆動回路を適用した場合のデータである。

図 5 において、縦軸はファラデー回転角の温度変動で単位は度（d e g）、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルト V である。

【 0 0 8 8 】

図 5 に示す如く、ファラデー回転角が 4 0 度以下の範囲で温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値が 0. 5 度以下であることが判る。これを従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動値に比較すると大幅に改善されていることが判る。

図 6 は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性（その 1）で、ファラデー回転子に図 3 の駆動回路を適用した場合の温度特性である。

【 0 0 8 9 】

尚、上記光可変減衰器は、上記ファラデー回転子を、複屈折結晶から成る偏光子と該複屈折結晶から成る検光子の間に挿入して光を透過させる構成である。

図 6 において、縦軸は光可変減衰器の減衰量で単位は d B、横軸はファラデー回転子の電磁石を駆動する電圧源の電圧で単位はボルトである。そして、温度 2 5℃、0℃ 及び 6 5℃ について測定している。

【 0 0 9 0 】

図 6 に示す如く、1 デイビジョン 5 d B で減衰量を表示する場合には減衰量の温度特性は殆ど認められない。

図 7 は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動（その 1）であり、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値をプロットしたもので、図 3 の駆動回路を適用した場合のデータである。

【 0 0 9 1 】

図 7 において、縦軸は光可変減衰器の減衰量の温度変動で単位は d B、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルト（V）である。

図 7 に示す如く、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値が 0. 8 d B 以

下となっている。これを従来のファラデー回転子を適用した光可変減衰器における最大変動値に比較すると大幅に改善されていることが判る。

【 0 0 9 2 】

図 8 は、光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その 2）である。

図 8 において、3-2 は電磁石で、コイル 3-2 1 及び磁芯 3-2 2 によって構成される。1 3 は出力電圧に温度特性がない電圧源、1 4 は電圧源 1 3 の出力端子に直列に接続される直列抵抗である。

【 0 0 9 3 】

例えば、ファラデー回転角の温度係数がファラデー回転角 1 度当たり -0.0025 （度/℃）と比較的溫度係数が小さいファラデー素子を適用し、コイル 3-2 1 の電気抵抗が約 $50\ \Omega$ 、該電気抵抗の溫度係数が $+0.02\ \Omega/^\circ\text{C}$ 程度の場合に、直列抵抗 1 4 にニクロムによる抵抗を直列接続して総抵抗を $70\ \Omega$ としている。

【 0 0 9 4 】

ニクロムの抵抗の溫度係数は銅に比較すると $1/50$ 程度であるので、ニクロム抵抗を直列接続することによって総抵抗の溫度係数を小さくすることができ、これによってファラデー素子のファラデー回転角の溫度係数と駆動回路の溫度係数を合わせることができる。

尚、ファラデー素子のファラデー回転角の溫度係数が大きいことが判った場合には、直列抵抗として銅より溫度係数が大きい抵抗体を使用すればよい。

【 0 0 9 5 】

図 9 は、本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の溫度特性（その 2）で、図 8 の駆動回路を適用した場合の溫度依存性である。

図 9 において、縦軸はファラデー回転角で単位は度（deg）、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルト（V）である。そして、溫度 25°C 、 0°C 及び 65°C について測定している。

【 0 0 9 6 】

図 9 に示す如く、ファラデー回転角が 40 度以下において、ファラデー回転角

の温度特性は殆ど認められないことが判る。

図 1 0 は、本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動（その 2）であり、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値をプロットしたもので、図 8 の駆動回路を適用した場合のデータである。

【 0 0 9 7 】

図 1 0 において、縦軸はファラデー回転角の温度変動で単位は度（d e g）、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルト（V）である。

図 1 0 に示す如く、ファラデー回転角が 4 0 度以下の範囲で温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値がやはり 0. 5 度以下であることが判る。これを従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動値に比較すると大幅に改善されていることが判る。

【 0 0 9 8 】

図 1 1 は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性（その 2）で、ファラデー回転子に図 8 の駆動回路を適用した場合の温度特性である。

尚、上記光可変減衰器は、上記ファラデー回転子を、複屈折結晶から成る偏光子と該複屈折結晶から成る検光子の間に挿入して光を透過させる構成である。

【 0 0 9 9 】

図 1 1 において、縦軸は光可変減衰器の減衰量で単位は d B、横軸はファラデー回転子の電磁石を駆動する電圧源の電圧で単位はボルト（V）である。そして、温度 2 5℃、0℃ 及び 6 5℃ について測定している。

図 1 1 に示す如く、1 デイビジョン 5 d B で減衰量を表示する場合には減衰量の温度特性は殆ど認められない。

【 0 1 0 0 】

図 1 2 は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動（その 2）であり、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値をプロットしたもので、図 8 の駆動回路を適用した場合のデータである。

図 1 2 において、縦軸は光可変減衰器の減衰量の温度変動で単位は d B、横軸は定電圧電源の電圧で単位はボルト（V）である。

【 0 1 0 1 】

図 1 2 に示す如く、温度範囲 0℃ から 6 5℃ における最大変動値が 0. 6 d B 以下となっている。これを従来のファラデー回転子を適用した光可変減衰器における最大変動値と比較すると大幅に改善されていることが判る。

図 1 3 は、本発明のファラデー回転子を適用した光シャッタの温度特性で、ファラデー回転子の電磁石の駆動回路には基本的に図 3 の構成を適用しており、減衰量が最小となる電圧と減衰量が最大になる電圧を切り替えるようにしている。

【 0 1 0 2 】

図 1 3 において、縦軸は光シャッタの減衰量で単位は d B、横軸はファラデー回転子の電磁石の駆動回路の電圧源の電圧で単位はボルト (V) である。

図 1 3 の特性を図 3 1 の特性と比較して見れば明らかなように、温度特性は大幅に改善されており、減衰量が最小となる電圧を 0 ボルト、減衰量が最大になる電圧を 4. 7 ボルトに設定して電圧を切り替えれば、温度範囲 0℃ から 6 5℃ にわたってシャット・ダウン減衰量 4 0 d B 程度を安定に得ることができる光シャッタが実現されている。このため、従来の光シャッタの如く、シャット・ダウンの電流値を減衰量を検出した情報又は温度を検出した情報によって変動させて、シャット・ダウンの減衰量を一定に保つ制御を行なう必要性がなくなり、光シャッタのコストを低下することができる。

【 0 1 0 3 】

ここで、図 3 の構成を用いても、図 8 の構成を用いてもファラデー回転角の温度特性、光可変減衰器の温度特性、光シャッタの温度特性が大幅に改善できることが判ったが、両者を比較した場合、図 3 の構成は図 8 の構成において直列抵抗 1 4 の抵抗値が 0 になった特殊ケースである。

即ち、直列抵抗を有する電圧源によってコイルに電流を供給する場合、該直列抵抗の値として 0 も許容できるということが判る。そして、数学的には該直列抵抗の値には無限大も許容できるが、コイルに電流を流してファラデー回転を起こさせるという実用レベルの話になると、該直列抵抗の抵抗値が無限大ではコイルに電流を流すことができないので許容できない。

【 0 1 0 4 】

又、図 8 の構成において直列抵抗は固定抵抗であることを想定しているが、当然可変抵抗であってもよい。そして、電圧源に直列な抵抗を可変抵抗にすることによって、設計時のコイルの抵抗値及び直列抵抗の抵抗値とそれらの温度係数ではファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性を正確に補償できない場合でも、該直列抵抗の抵抗値を可変調整することによってファラデー回転角の温度特性を正確に補償できるという利点が生ずる。

【 0 1 0 5 】

図 1 4 は、光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その 3）である。

図 1 4 において、3-2 は電磁石で、コイル 3-2 1 及び磁芯 3-2 2 によって構成される。1 5 は出力電流に温度係数がない電流源、1 6 は電流源 1 5 の出力端子に並列に接続される並列抵抗である。

【 0 1 0 6 】

ここで、出力電流に温度係数がない電流源は、ダイオード又はサーミスタ等の温度特性を有する素子によって該電流源を構成するトランジスタの温度特性を補償するという手段によって得られる。そして、このこと自体は当業者には容易に実現できる技術であるので、これ以上の説明は割愛する。

先にも記載した如く、典型的な磁気光学結晶のファラデー回転角 1 度当たりの温度係数は典型的には -0.0025 度/℃ 程度であるが、市場で供給されている磁気光学結晶について調査すると -0.0012 度/℃ から -0.0030 度/℃ くらいの範囲でばらつきを持っている。今、 -0.0015 度/℃ 程度の温度係数の磁気光学結晶を用いた場合、コイルの電流値の温度係数はほぼ -0.07 mA/℃ となる。そして、コイルの抵抗値は 25℃ で $48\ \Omega$ 、温度係数は $0.18\ \Omega/^\circ\text{C}$ である。

【 0 1 0 7 】

この条件の時、図 1 4 の構成の並列抵抗 1 6 を抵抗値が $77\ \Omega$ で温度係数が $0.03\ \Omega/^\circ\text{C}$ のタンタル薄膜抵抗とし、出力電流に温度特性がない電流源 1 5 によってコイルに電流を供給するのが最適となる。尚、「最適」というのはファラデー回転角の温度係数を十分に抑圧できて、且つ、コイルと外部に接続される抵

抗で消費される電力が小さいという条件で判定するもので、直列抵抗を有する電圧源によって電流供給する場合と比較しながら、この後すぐに解析的に説明する。

【 0 1 0 8 】

直列抵抗を有する電圧源によって電流供給する図 8 の構成において、コイル 3 - 2 1 の抵抗値を R_1 とし、直列抵抗 1 4 の抵抗値を R_2 とし、電圧源 1 3 の出力電圧を V とし、コイルに流れる電流を I_C とおくと、

$$I_C = V / (R_1 + R_2) \quad (1)$$

を得る。

【 0 1 0 9 】

抵抗値 R_1 及び R_2 には温度特性があって、出力電圧 V には温度特性がないという実際にありうるケースを考えると、電流 I_C の温度係数は

$$\begin{aligned} d I_C / d T = & -V (d R_1 / d T + d R_2 / d T) \\ & / (R_1 + R_2)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

として得られる。

【 0 1 1 0 】

更に実用的なケース、即ち、抵抗値 R_2 の温度係数が抵抗値 R_1 の温度係数より十分に小さいというケースを考えると、

$$\begin{aligned} d I_C / d T = & -V (d R_1 / d T) \\ & / (R_1 + R_2)^2 \\ = & - (I_C / (R_1 + R_2)) \\ & \times (d R_1 / d T) \end{aligned} \quad (3)$$

を得る。

【 0 1 1 1 】

そして、図 8 の構成の消費電力を W とすると、

$$W = I_C^2 \times (R_1 + R_2) \quad (4)$$

となる。

一方、出力電流に温度係数がない電流源によって電流を供給する図 1 4 の構成において、コイル 3 - 2 1 の抵抗値を R_1 とし、並列抵抗 1 6 の抵抗値を R_2 と

し、電流源 15 の出力電流を I とし、コイルに流れる電流を I_C とおくと、

$$I_C = I \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad (5)$$

を得る。

【0112】

抵抗値 R_1 及び R_2 には温度特性があって、出力電流電流 I には温度特性がないという実際にありうるケースを考えると、電流 I_C の温度係数は

$$\begin{aligned} d I_C / d T = & (I / (R_1 + R_2)^2) \\ & \times \{ (d R_2 / d t) (R_1 + R_2) \\ & - R_2 (d R_1 / d t + d R_2 / d t) \} \\ & \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

となる。

【0113】

更に実用的なケース、即ち、抵抗値 R_2 の温度係数が抵抗値 R_1 の温度係数より十分に小さいというケースを考えると、先の直列抵抗を有する電圧源による駆動の場合と同じ結果、即ち、式 (3) を得る。

そして、図 14 の構成の消費電力 W は、

$$W = I_C^2 R_1 (R_1 + R_2) / R_2 \quad (7)$$

となる。

【0114】

図 20 は、(図 8 の構成における) 直列抵抗又は (図 14 の構成における) 並列抵抗の変化に対するコイル電流の温度係数及び消費電力をまとめた表である。尚、直列抵抗と並列抵抗を区別しないで説明する時には「外部抵抗」ということにする。

コイル電流の温度係数の絶対値は、上記の如く外部抵抗の抵抗値 R_2 の温度係数がコイル抵抗の抵抗値 R_1 の温度係数より十分に小さいとしているので、抵抗値 R_2 の変化に対して、図 8 に図示した電圧駆動でも図 14 に図示した電流駆動でも同じ値になって、数学的には R_2 が無限大の時に 0 になる。従って、コイル電流の温度係数の絶対値については、電圧駆動でも電流駆動でも変わりがない。

【0115】

ここで、電圧駆動の時に単に R_2 が無限大であるとすればコイルに電流流る電流が 0 になり、ファラデー回転が起きないので実用的には使えない状態である。従って、電圧源に直列に接続する抵抗の抵抗値 R_2 を大きくする必要がある時には電圧源の出力電圧 V を大きくしてやる必要があり、消費電力は増加し、 R_2 が無限大という極限では消費電力は無限大になる。

【 0 1 1 6 】

同様に、電流駆動の時に R_2 が 0 ということはコイルに電流が流れず、ファラデー回転が起きないので実用的には使えない状態である。従って、電流源に並列に接続する抵抗の抵抗値 R_2 を小さくする必要がある時には電流源の出力電流 I を大きくしてやる必要があり、 R_2 が 0 という極限では消費電力は無限大になる。

【 0 1 1 7 】

従って、ファラデー回転が起きる範囲で、コイル電流の温度係数を所要の値にできて消費電力が小さいという条件で回路を設計するのが好ましい。

この意味で、同じファラデー回転子を用いて図 8 の構成又は図 1 4 の構成で温度補償をする場合、消費電力というパラメタを含めて設計するので、図 8 の構成と図 1 4 の構成に対する温度特性は微妙に異なったものになる。又、異なる温度係数のファラデー回転子を用いて図 8 の構成と図 1 4 の構成で温度補償をする場合、元来コイル電流に要求される温度係数が異なるので、図 8 の構成と図 1 4 の構成に対する温度特性は異なったものになるのが当然である。

【 0 1 1 8 】

以降、図 1 4 の構成を適用した場合のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性、可変光減衰器の減衰量の温度係数及び光シャッタの減衰量の温度係数のデータを示す。

図 1 5 は、本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性（その 3）、図 1 6 は、本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動（その 3）である。

【 0 1 1 9 】

図 1 5 を見れば温度 0℃ から 6 5℃ にわたって従来の温度特性より改善されて

いることが判るが、電流値に対する温度変動値で表わした図 1 6 を見ればそれが更にはっきりする。

尚、図 1 5 と図 9 の特性に差があるのは先に説明した通りである。

図 1 7 は、本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性（その 3）、図 1 8 は、本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動（その 3）で、図 1 4 の構成によってコイル電流の温度補償をした結果である。

【 0 1 2 0 】

特に、図 1 8 と図 3 0 を比較すれば明らかな如く、本発明により光可変減衰器の減衰量の温度特性の方がはるかに良好であることが判る。

図 1 9 は、本発明の可変ファラデー回転子を適用した光シャッタの温度特性（その 2）で、図 1 4 の構成を用いることによってコイル電流の温度補償をした結果である。

【 0 1 2 1 】

図 1 9 と図 3 1 を比較すれば差は歴然としており、本発明により光可変減衰器の減衰量の温度特性の方がはるかに良好であることが判る。

かくの如く、ファラデー回転子の電磁石のコイルに、並列抵抗を有する電流源によって電流を供給する構成によっても、コイル電流の温度係数を適切に制御することができ、ファラデー回転子、光可変減衰器及び光シャッタの温度特性を大幅に改善することができる。

【 0 1 2 2 】

尚、図 1 4 の構成は一般的なもので、図 1 4 の構成において並列抵抗が無限大というケースもありうることは、図 8 の構成において直列抵抗が 0 というケースをありうることと同じである。

図 2 1 は、光可変等化器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その 1）である。

【 0 1 2 3 】

図 2 1 において、3-2 は電磁石で、コイル 3-2 1 及び磁芯 3-2 2 によって構成され、3-2 a も電磁石で、コイル 3-2 1 a 及び磁芯 3-2 2 a によっ

て構成される。13は出力電圧に温度係数がない電圧源である。

ここで注意を要するのは、図32の光可変等化器において第一のファラデー回転子3と第二のファラデー回転子3aにおいて透過光に与える回転角は絶対値が同じで逆方向でなければならないので、コイル3-21とコイル3-21aに流れる電流の向きを逆にしていることである。

【0124】

尚、図21の構成によるファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性の改善の原理は図3の構成と同じであるので詳細な説明は割愛する。

図22は、光可変等化器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その2）である。

図22において、3-2は電磁石で、コイル3-21及び磁芯3-22によって構成され、3-2aも電磁石で、コイル3-21a及び磁芯3-22aによって構成される。13は出力電圧に温度係数がない電圧源、14及び14aは電圧源13の出力端子に直列に接続される直列抵抗である。

【0125】

ここで注意を要するのは、図32の光可変等化器において第一のファラデー回転子3と第二のファラデー回転子3aにおいて透過光に与える回転角は絶対値が同じで逆方向でなければならないので、コイル3-21とコイル3-21aに流れる電流の向きを逆にしていることである。

尚、図22の構成によるファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性の改善の原理は図8の構成と同じであるので詳細な説明は割愛する。

【0126】

図23は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変等化器の透過強度特性で、図21の構成による電磁石の駆動回路を用いた場合のデータである。

尚、上記光可変等化器は、偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、偏光面一致素子によって偏光分離された2条の光の偏光を一致させ、第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた2条の光の偏光角に所定のファラデー回転を与え、透過率波長特性可変素子によって該ファラデー回転に対応する透過率の波長特性を与え、第二のファラデー回転子において該第一のファラデー

回転子によって与えられた偏光角のファラデー回転とは逆で絶対値が等しい偏光角のファラデー回転を与え、該透過率波長特性可変素子において生ずる P 偏光と S 偏光の位相差を位相差制御素子によって補償し、偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成する光可変等化器において、該第一のファラデー回転子および該第二のファラデー回転子に請求項 2 記載のファラデー回転子を適用したものである。

【 0 1 2 7 】

図 2 3 において、縦軸は光の透過強度で単位は d B、横軸は光の波長で単位は n m、パラメタは電磁石の電圧源の電圧で単位はボルト (V) である。

図 2 3 に示す如く、電圧源の電圧を 0 ボルトから 4 ボルトまで変化させると、波長 1 5 3 0 n m から 1 5 6 0 n m 強において 0 d B から約 1 0 d B の範囲で透過強度を可変にすることができる。

【 0 1 2 8 】

図 2 4 は、本発明のファラデー回転子を適用した光可変等化器の温度特性と等化度温度偏差で、図 2 1 の構成による電磁石の駆動回路を用いた場合のデータである。

図 2 4 において、左側の縦軸は光の透過強度で単位は d B、右側の縦軸は等化温度偏差で単位は d B、横軸は光の波長で単位は n m である。そして、透過強度のデータは図 2 3 における電圧 4 ボルトに対応する透過強度で、温度範囲 0℃、2 5℃及び 6 5℃のデータが重なっている。又、等化度温度偏差は電圧 4 ボルトに対応する透過強度の温度範囲 0℃から 6 5℃における透過強度の変動値を求めたものである。

【 0 1 2 9 】

図 2 4 に示す如く、本発明のファラデー回転子を適用した光可変等化器の等化度温度偏差は 0. 1 d B 以下であり、従来の光可変等化器に比較して温度特性が大幅に改善されていることが判る。

即ち、図 2 1 の構成を適用することにより、ファラデー回転角の温度特性が良好なファラデー素子と、該ファラデー素子を適用することにより温度特性が良好な光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器を得ることができた。そして、上

では図 2 2 の構成を適用した結果を示していないが、図 2 1 及び図 2 2 の構成は図 3 及び図 8 の構成を単に組み合わせたものであるから、図 2 2 の構成によっても同じ効果が得られることは明白である。

【 0 1 3 0 】

又、上では図 1 4 の構成を基本とするコイル電流補償の技術を適用した構成を光可変等化器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路に適用する例を説明していないが、図 8 の構成でも図 1 4 の構成でも同様な効果が得られている以上、図 1 4 の構成を基本とするコイル電流補償の技術を適用した場合にも同じ効果が得られることは、これ又、明白である。

【 0 1 3 1 】

(付記 1) ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、

第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設けることを特徴とする可変ファラデー回転子。

【 0 1 3 2 】

(付記 2) 付記 1 記載の可変ファラデー回転子において、

該可変ファラデー回転子の回転角を制御する上記第二の磁界を生成する電磁石のコイルに、

直列抵抗を有する、出力電圧に温度係数のない電圧源、

又は、並列抵抗を有する、出力電流に温度係数がない電流源のいずれかによって電流を供給することを特徴とする可変ファラデー回転子。

【 0 1 3 3 】

(付記 3) 付記 2 記載の可変ファラデー回転子を、

複屈折結晶から成る偏光子と該複屈折結晶から成る検光子の間に挿入して光を透過させる

ことを特徴とする光可変減衰器。

(付記 4) 付記 3 記載の光可変減衰器において、

上記電磁石のコイルに供給する電流を、該光可変減衰器の減衰量を最小にする電流値と該光可変減衰器の減衰量を最大にする電流値との間でスイッチすることを特徴とする光シャッタ。

【 0 1 3 4 】

(付記 5) 偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、
偏光面一致制御素子によって偏光分離された 2 条の光の偏光を一致させ、
第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた 2 条の光の偏光角に所定の回転を与え、

透過率波長特性可変素子によって該回転に対応する透過率の波長特性を与え、
第二のファラデー回転子において該第一のファラデー回転子によって与えられた偏光角の回転とは逆で絶対値が等しい偏光角の回転を与え、

透過率波長特性可変素子において生ずる P 偏光と S 偏光の位相差を位相差制御素子によって補償し、

偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成する
光可変等化器において、

該第一のファラデー回転子および該第二のファラデー回転子に付記 2 記載の可変ファラデー回転子を適用することを特徴とする光可変等化器。

【 0 1 3 5 】

(付記 6) 付記 2 記載の可変ファラデー回転子において、上記コイルの線材を銅又は銅化合物のいずれかにすることを特徴とする可変ファラデー回転子。

(付記 7) 付記 2 記載のファラデー回転子において、
上記直列抵抗又は上記並列抵抗を構成する抵抗体はニクロムであることを特徴とするファラデー回転子。

【 0 1 3 6 】

(付記 8) 付記 2 記載の可変ファラデー回転子において、
上記直列抵抗又は上記並列抵抗が可変抵抗であることを特徴とする可変ファラデー回転子。

(付記 9) 付記 2 記載の可変ファラデー回転子において、

上記直列抵抗が 0 又は上記並列抵抗が無大である
ことを特徴とする可変ファラデー回転子。

【 0 1 3 7 】

【発明の効果】

以上詳述した如く、本発明によれば、ファラデー回転角の温度特性が良好な可変ファラデー回転子と該可変ファラデー回転子を適用する結果温度特性が良好な光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器を実現することができる。

即ち、第一の発明によれば、ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設定する。従って、ファラデー回転角の制御を行なう第二の磁界の方向には磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸が存在しないので、該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度依存性は磁気異方性の影響を受けなくなり、該磁気光学結晶自体の温度依存性で決まるようになって、広いファラデー回転角にわたって一定となる。このため、該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度依存性をキャンセルすることが容易になる。

【 0 1 3 8 】

又、第二の発明によれば、第一の発明の可変ファラデー回転子において、該可変ファラデー回転子の回転角を制御する上記第二の磁界を生成する電磁石のコイルに、直列抵抗を有する、出力電圧に温度係数のない電圧源、又は、並列抵抗を有する、出力電流に温度係数のない電流源のいずれかによって電流を供給するので、該コイルに流れる電流値が該電圧源の直列抵抗又は該点電流源の並列抵抗の温度係数に従って変化してファラデー回転角を温度変動に伴って変化させる。一方、第一の発明のファラデー回転子に適用する磁気光学結晶はほぼ一定な温度係数に従うファラデー回転角の温度特性を有している。従って、該電圧源の直列抵抗又は該点電流源の並列抵抗及び電磁石のコイルの抵抗との関係によって該磁気光学結晶のファラデー回転角の温度特性を抑圧可能で、温度特性が良好なファラデー回転子を得ることができる。

【 0 1 3 9 】

又、第三の発明によれば、該偏光子によって分離された常光Oと異常光Eとが該ファラデー回転子のファラデー回転角に応じて偏光を回転させられて該検光子に入射される。該検光子において該偏光子によって分離された常光Oが更に常光OOと異常光OEに分離され、該検光子において該偏光子によって分離された異常光常光Eが更に常光EOと異常光EEに分離されるが、光ファイバのコアに集光される常光OOと異常光EEの強度が該ファラデー回転子のファラデー回転角に応じて変化するので、上記構成によって光可変減衰器を構成することができる。その上、該ファラデー回転子の温度特性が改善されているので、光可変減衰器としての温度特性も改善される。

【0140】

又、第四の発明によれば、上記光可変減衰器において、上記電磁石のコイルに供給する電流を、該光可変減衰器の減衰量を0にする電流値と該光可変減衰器の減衰量を最大にする電流値との間でスイッチするので光シャッタを構成することができ、且つ、温度特性が改善されたファラデー回転子を使用しているので、特別な制御をしなくてもシャット・ダウン時の減衰量を安定化することができる。

【0141】

更に、第五の発明によれば、偏光分離素子によって入力光を常光と異常光とに分離し、偏光面一致制御素子によって偏光分離された2条の光の偏光を一致させ、第一のファラデー回転子によって偏光を一致させた2条の光の偏光角に所定の回転を与え、透過率波長特性可変素子によって該回転に対応する透過率の波長特性を与え、第二のファラデー回転子において該第一のファラデー回転子によって与えられた偏光角の回転とは逆で絶対値が等しい偏光角の回転を与え、偏光面復帰素子によって常光と異常光を合成するので、光可変等化器を構成することができる。その上、第二の発明の温度特性を改善されたファラデー回転子を適用するので、光可変等化器としての温度特性も改善することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の原理を説明するためのステレオ投影図。

【図2】 本発明によるファラデー回転子の例。

【図3】 光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（

その 1)。

【図 4】 本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性 (その 1)。

【図 5】 本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動 (その 1)。

【図 6】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性 (その 1)。

【図 7】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動 (その 1)。

【図 8】 光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路 (その 2)。

【図 9】 本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性 (その 2)。

【図 1 0】 本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動 (その 2)。

【図 1 1】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性 (その 2)。

【図 1 2】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動 (その 2)。

【図 1 3】 本発明のファラデー回転子を適用した光シャッタの温度特性。

【図 1 4】 光可変減衰器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路 (その 3)。

【図 1 5】 本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性 (その 3)。

【図 1 6】 本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動 (その 3)。

【図 1 7】 本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性 (その 3)。

【図 1 8】 本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度

変動（その３）。

【図 1 9】 本発明の可変ファラデー回転子を適用した光シャッタの温度特性（その２）。

【図 2 0】 直列抵抗又は並列抵抗の変化に対するコイル電流の温度係数及び消費電力。

【図 2 1】 光可変等化器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その１）。

【図 2 2】 光可変等化器に適用するファラデー回転子の電磁石の駆動回路（その２）。

【図 2 3】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変等化器の透過強度特性。

【図 2 4】 本発明のファラデー回転子を適用した光可変等化器の温度特性と等化度温度偏差。

【図 2 5】 可変ファラデー回転子の基本構成。

【図 2 6】 ガーネット単結晶の（１ １ １）面を中心としたステレオ投影図。

【図 2 7】 従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性。

【図 2 8】 従来のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動。

【図 2 9】 光可変減衰器の構成と減衰量の制御を説明する図。

【図 3 0】 従来のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動。

【図 3 1】 従来の光シャッタの温度特性。

【図 3 2】 光可変等化器の構成と動作を説明する図。

【図 3 3】 従来のファラデー回転子を適用した光可変等化器の温度特性と等化度温度偏差。

【符号の説明】

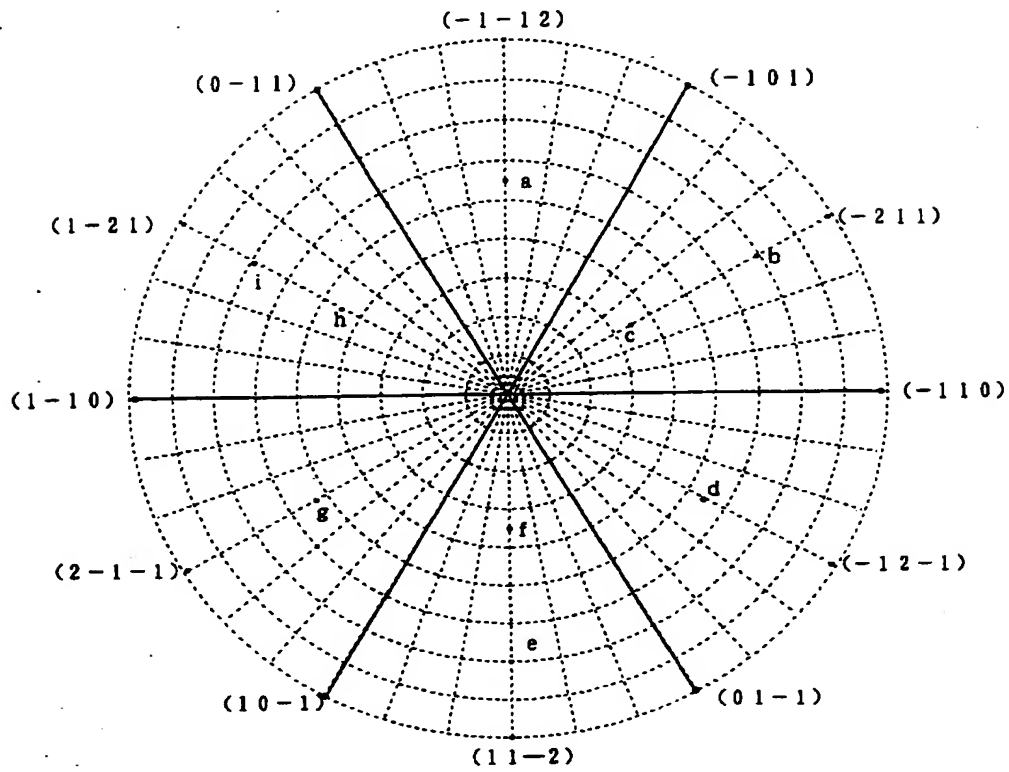
- 1 偏光分離素子
- 2 偏光面一致制御素子
- 3 第一のファラデー回転子
- 3-1 ファラデー素子

- 3-2 電磁石
- 3-3 永久磁石
- 3 a 第二のファラデー回転子
- 3-1 a ファラデー素子
- 3-2 a 電磁石
- 4 透過率波長特性可変素子
- 5 偏光面復帰素子
- 6 位相差制御素子
- 7 偏光合成素子
- 9 コリメート系
- 9-1 フェルール
- 9-2 レンズ・ホルダ
- 9-3 コリメート・レンズ
- 9 a コリメート系
- 9-1 a フェルール
- 9-2 a レンズ・ホルダ
- 9-3 a コリメート・レンズ
- 10 入力光ファイバ
- 10 a 出力光ファイバ
- 11 偏光子
- 12 検光子
- 13 電圧源
- 14 直列抵抗
- 14 a 直列抵抗
- 15 電流源
- 16 並列抵抗

【書類名】 図面

【図 1】

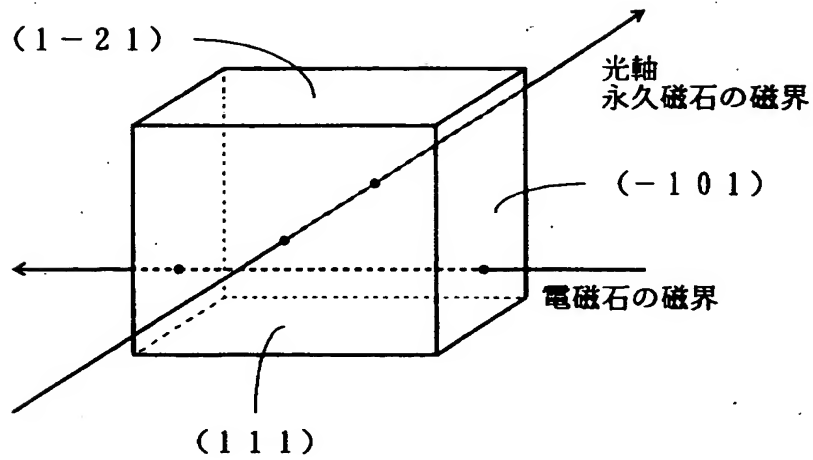
本発明の原理を説明するためのステレオ投影図



a : (0 0 1)	b : (-1 1 1)	c : (0 1 1)
d : (0 1 0)	e : (1 1 -1)	f : (1 1 0)
g : (1 0 0)	h : (1 0 1)	i : (-1 1)
中心 : (1 1 1)		

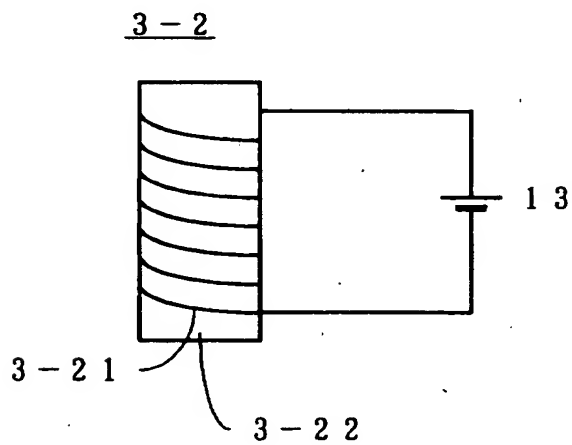
【図 2】

本発明によるファラデー回転子の例



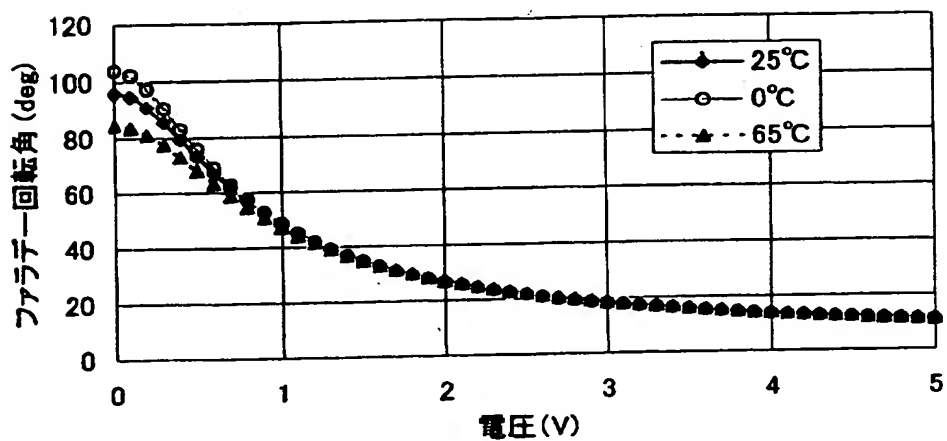
【図 3】

光可変減衰器に適用するファラデー回転子の
電磁石の駆動回路（その 1）



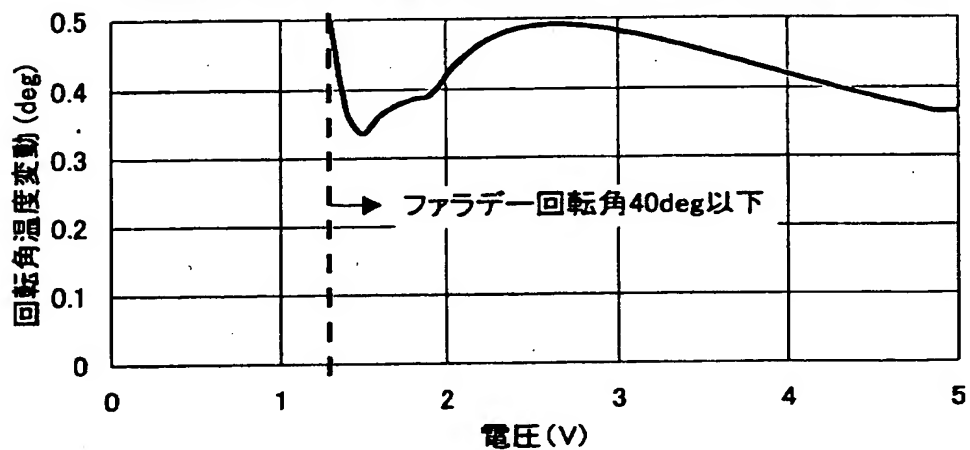
【図 4】

本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性(その1)



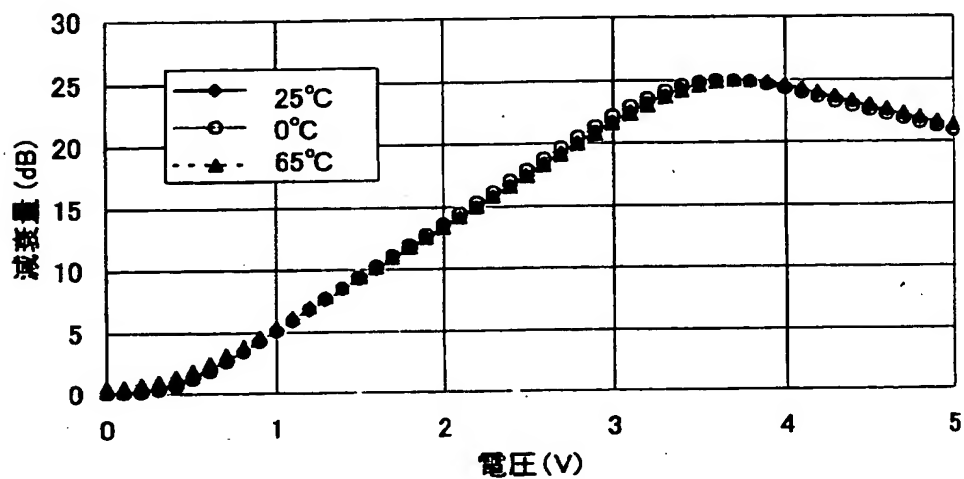
【図 5】

本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度変動(その1)



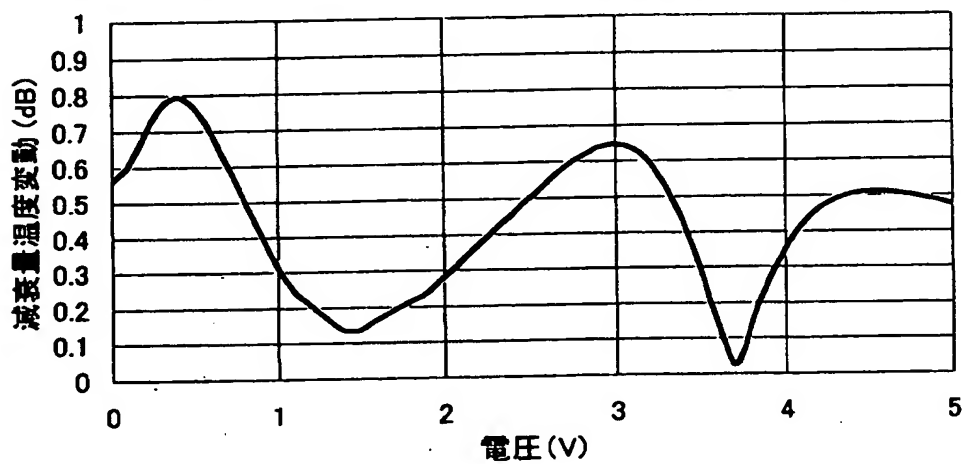
【図 6】

本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性(その1)



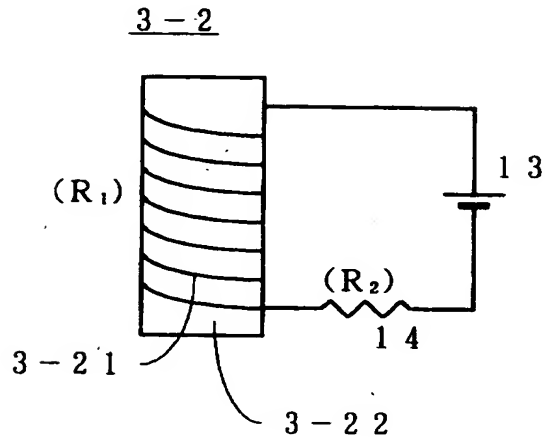
【図 7】

本発明のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動(その1)



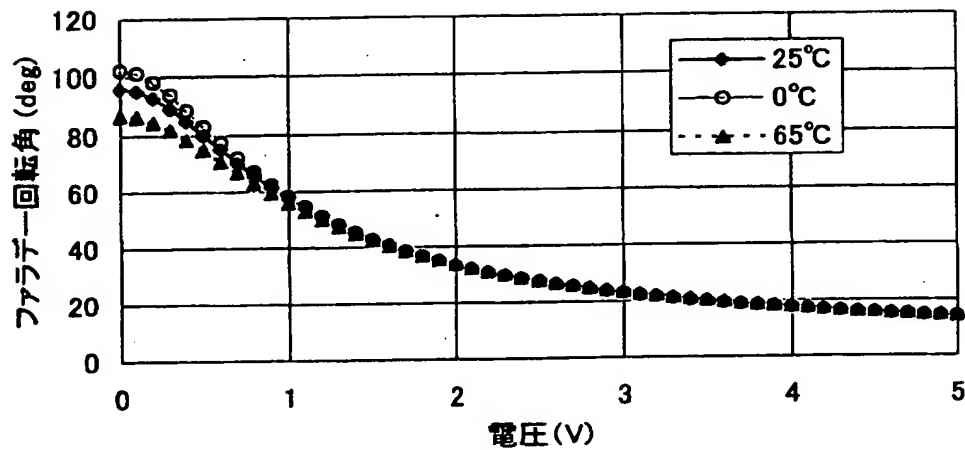
【図 8】

光可変減衰器に適用するファラデー回転子の
電磁石の駆動回路（その 2）

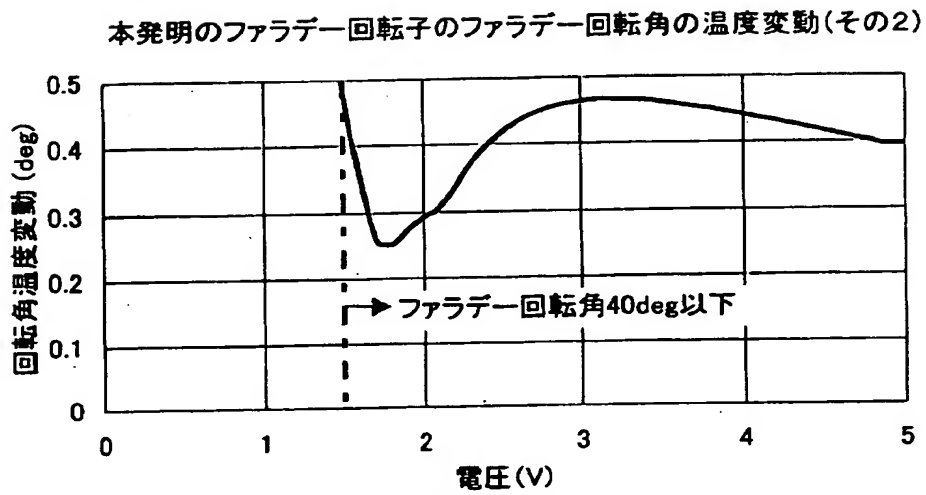


【図 9】

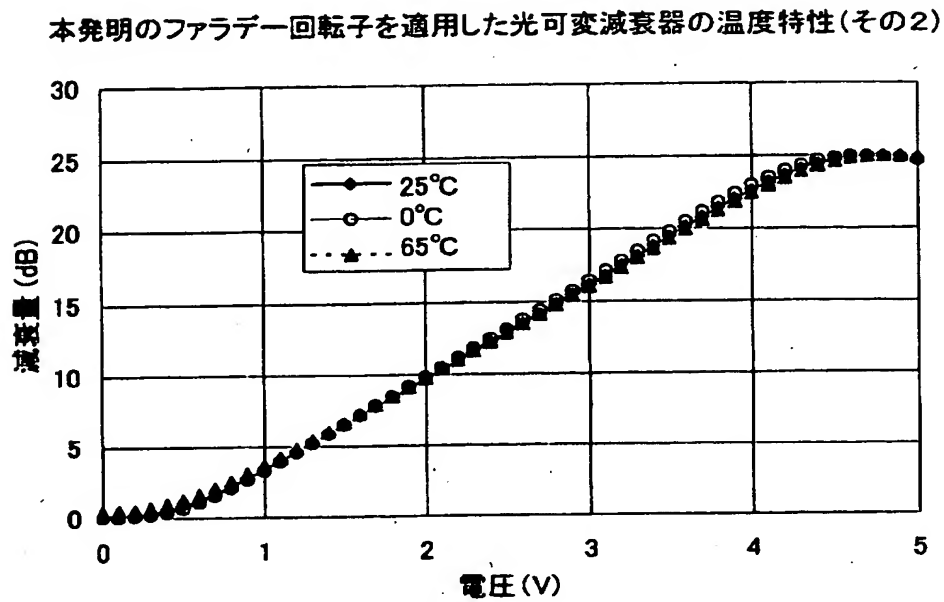
本発明のファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性（その 2）



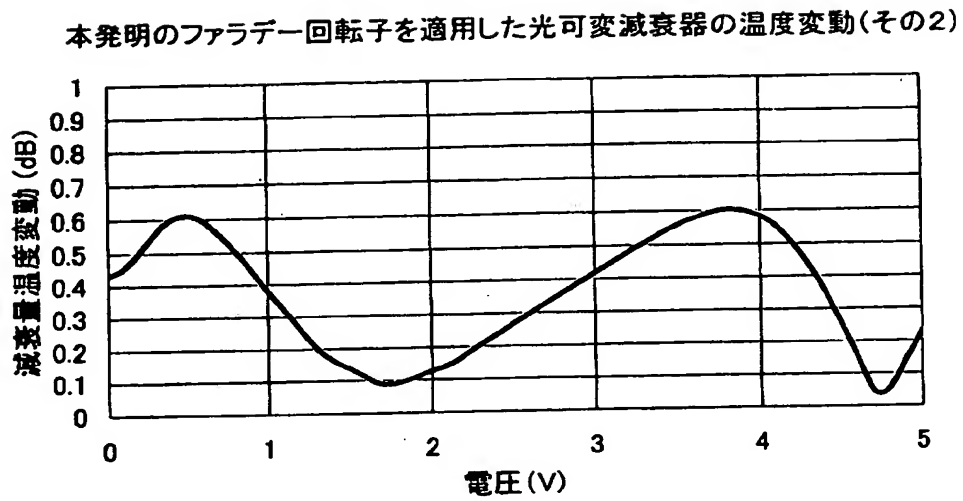
【図 10】



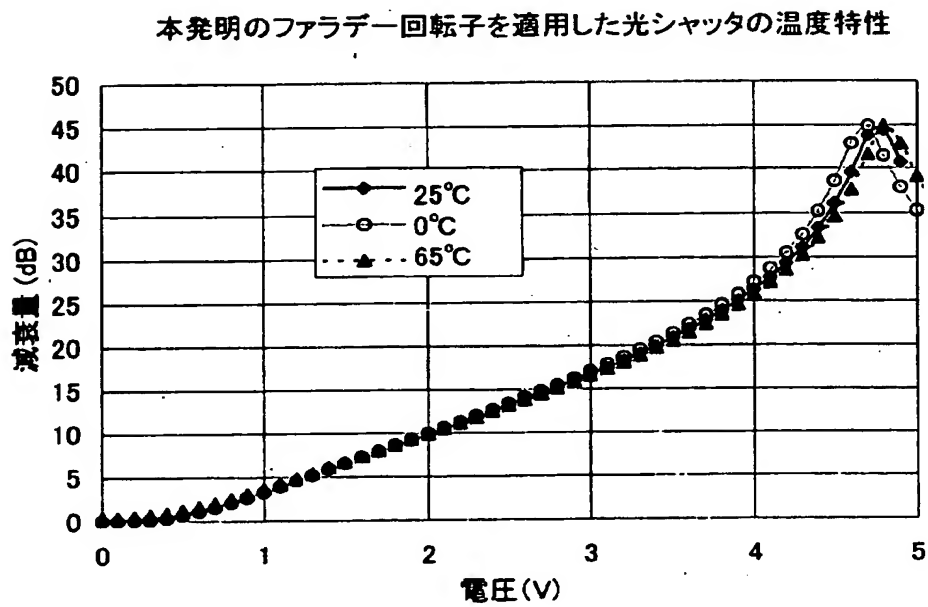
【図 11】



【図 1 2】

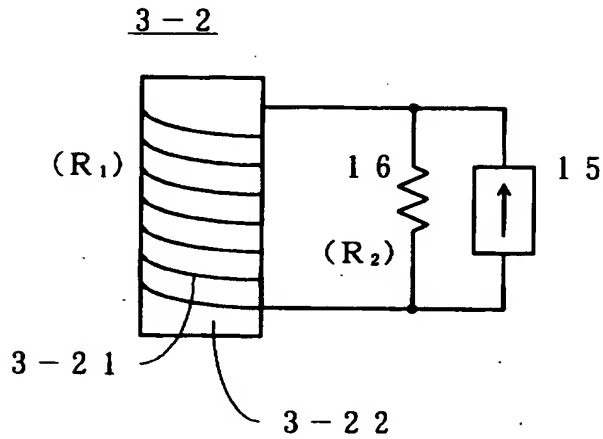


【図 1 3】



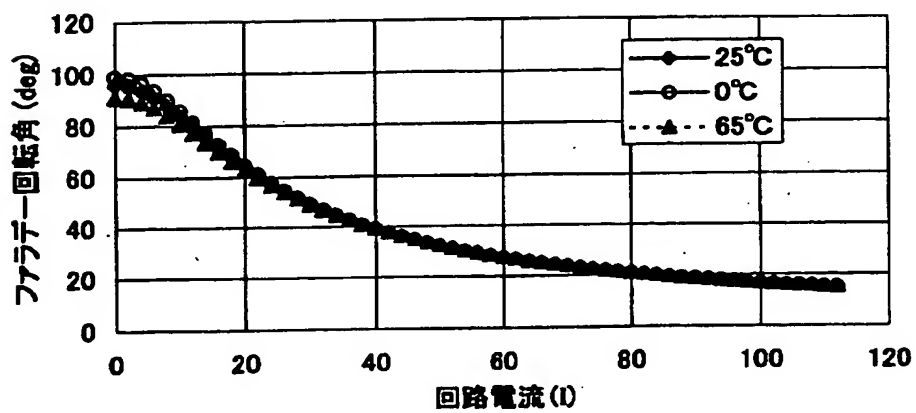
【図 1 4】

光可変減衰器に適用するファラデー回転子の
電磁石の駆動回路（その 3）



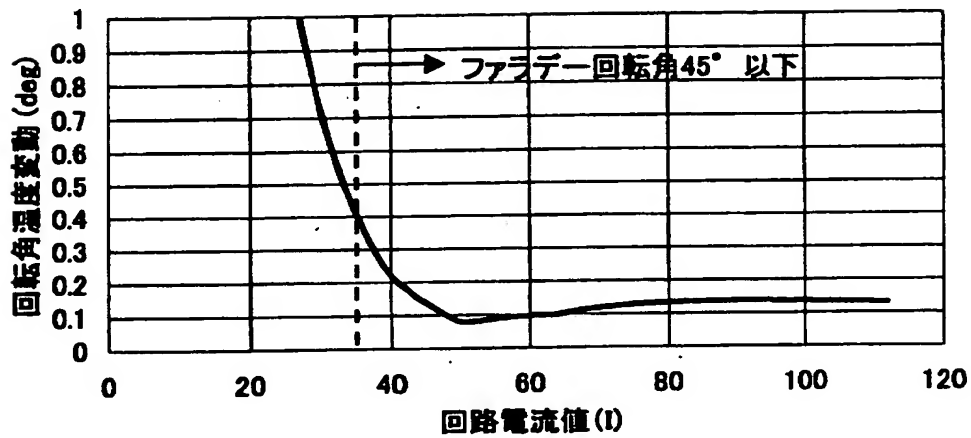
【図 1 5】

本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角の温度特性（その 3）



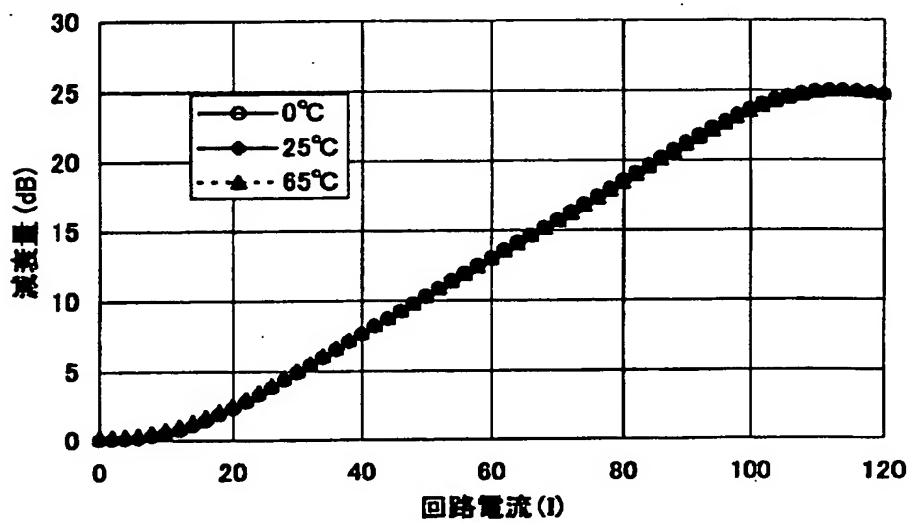
【図 1 6】

本発明の可変ファラデー回転子のファラデー回転角温度変動（その 3）



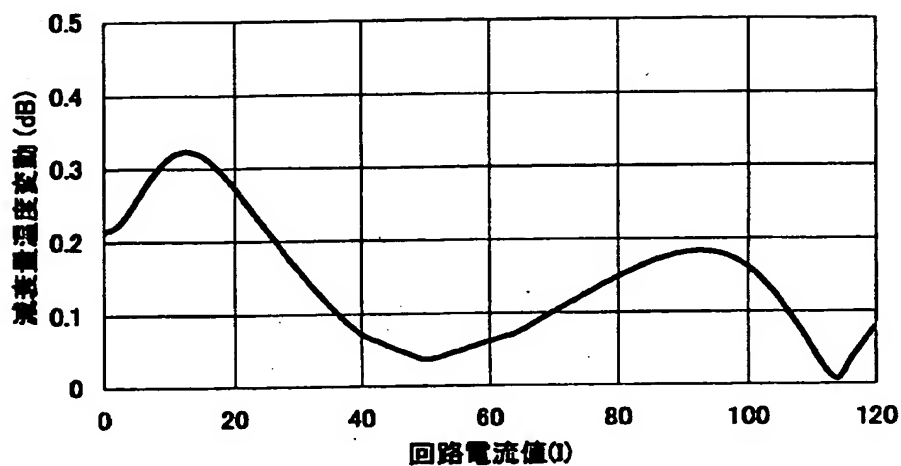
【図 1 7】

本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度特性（その 3）



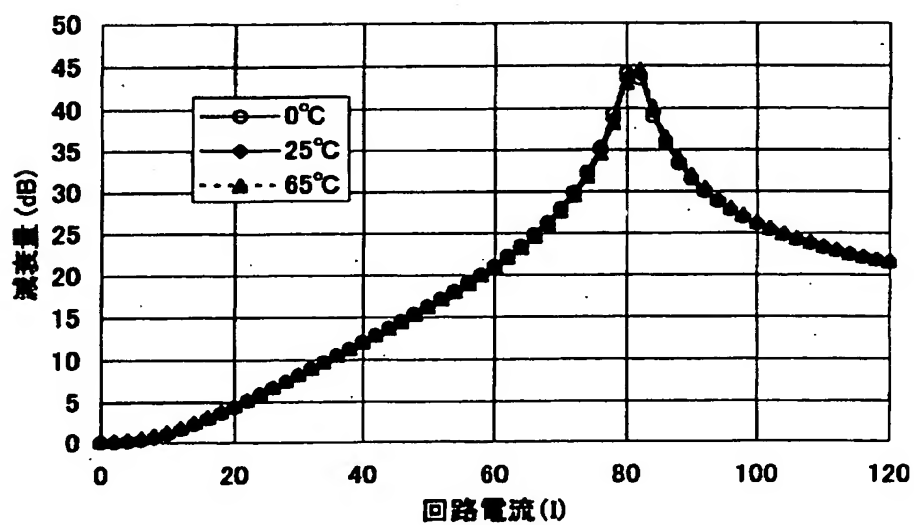
【図 1 8】

本発明の可変ファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動（その 3）



【図 1 9】

本発明の可変ファラデー回転子を適用した光シャッタの温度特性（その 2）



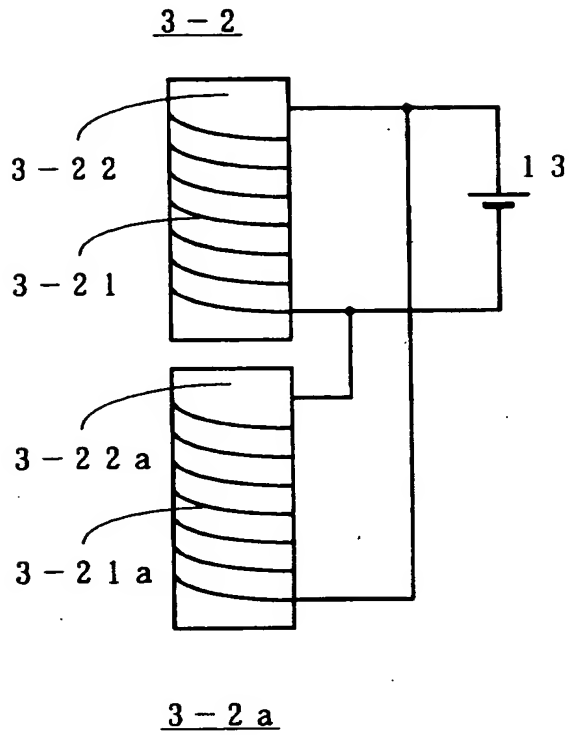
【図 2 0】

直列抵抗又は並列抵抗の変化に対するコイル電流の温度係数及び消費電力

	$R_2 \rightarrow 0$	$R_2 = R_1$	$R_2 \rightarrow \infty$
$ d I_c / d T $			
定電圧源駆動	$(I_c / R_1) (d R_1 / d T)$	$(I_c / 2 R_1) (d R_1 / d T)$	0
定電流源駆動	$(I_c / R_1) (d R_1 / d T)$	$(I_c / 2 R_1) (d R_1 / d T)$	0
W			
定電圧源駆動	$R_1 I_c^2$	$2 R_1 I_c^2$	∞
定電流源駆動	∞	$2 R_1 I_c^2$	$R_1 I_c^2$

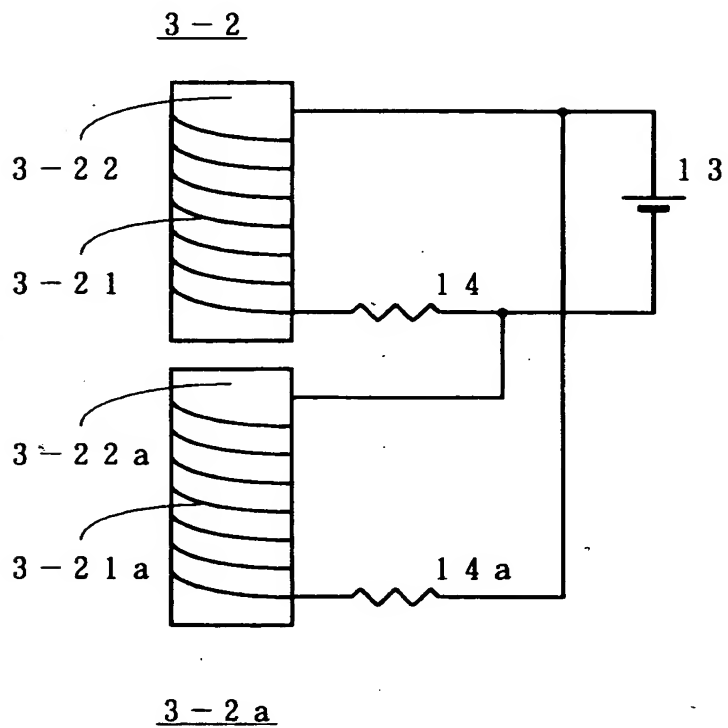
【図 2 1】

光可変等化器に適用するファラデー回転子の
電磁石の駆動回路（その 1）

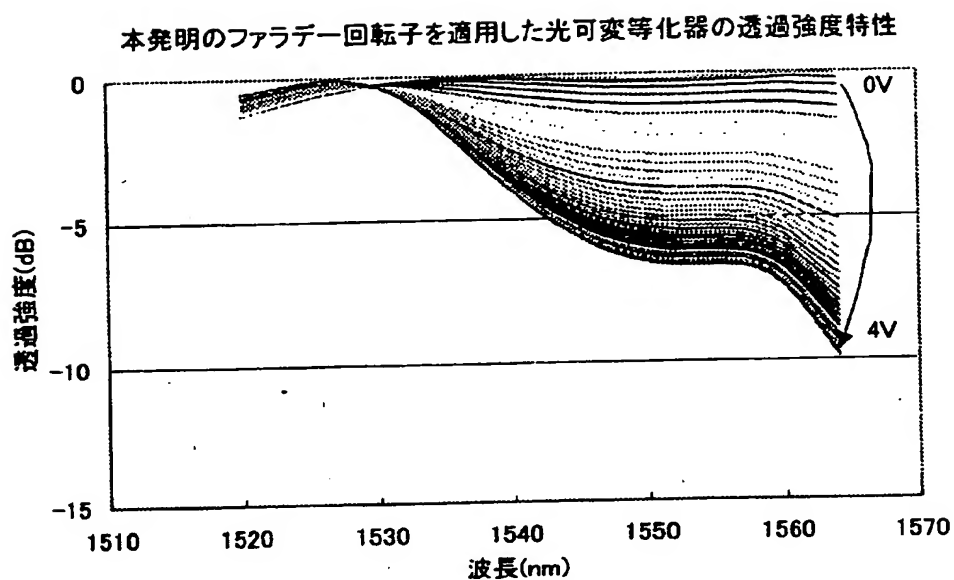


【図 2 2】

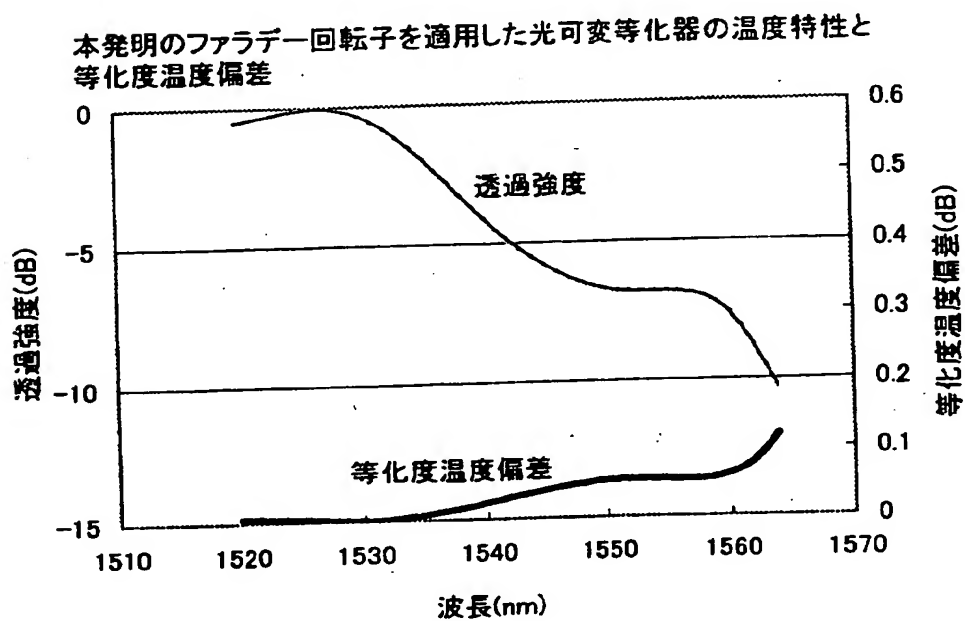
光可変等化器に適用するファラデー回転子の
電磁石の駆動回路（その 2）



【図 2 3】

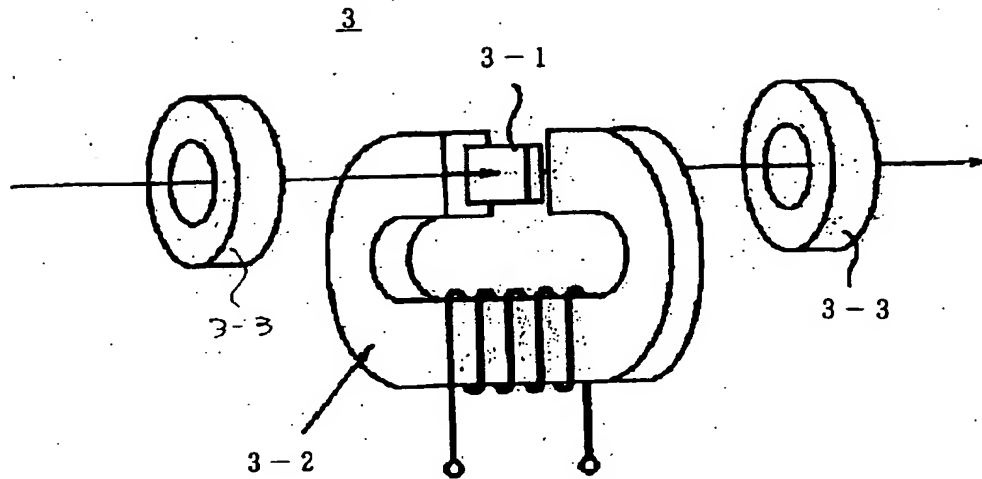


【図 2 4】



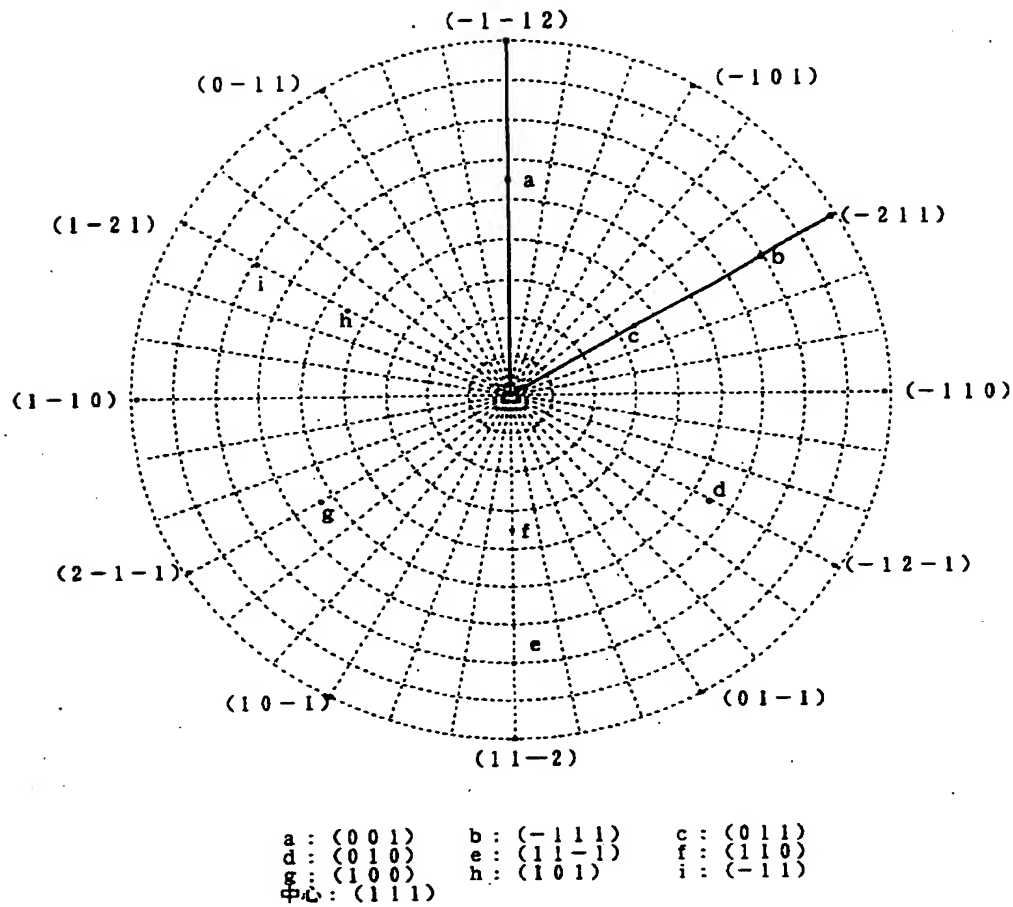
【図 2 5】

可変ファラデー回転子の基本構成

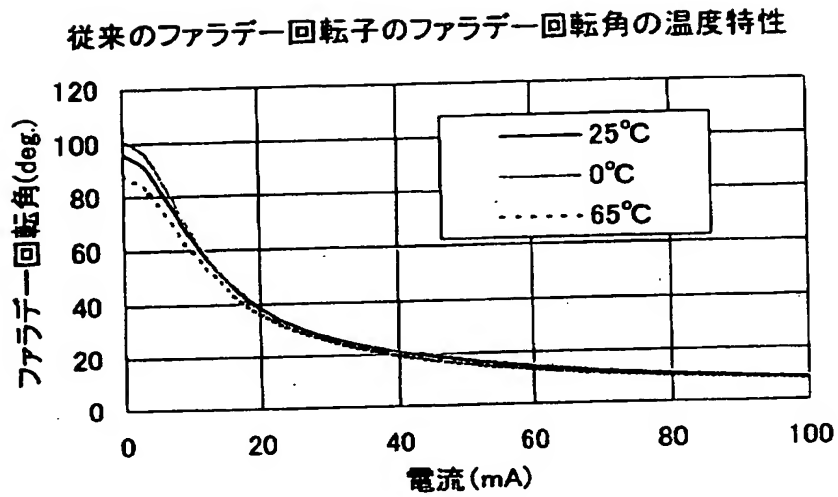


【図 26】

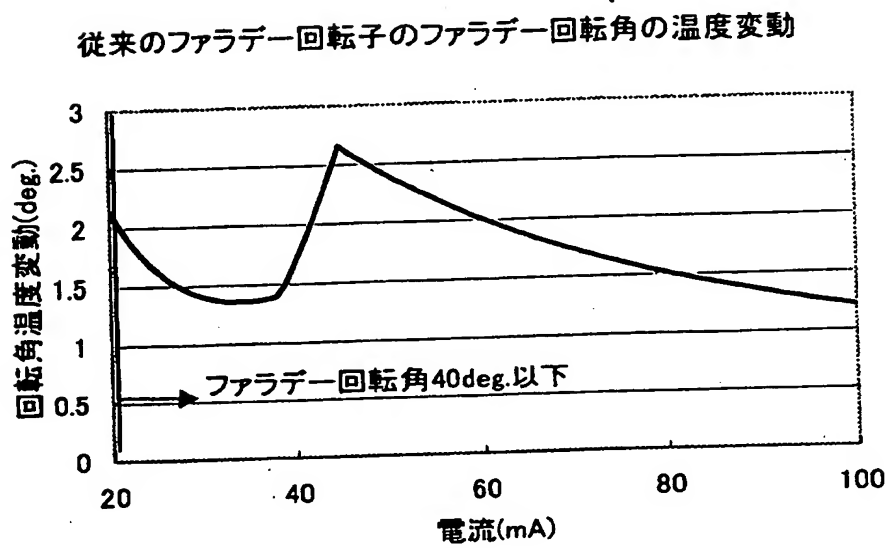
ガーネット単結晶の(111)面を中心としたステレオ投影図



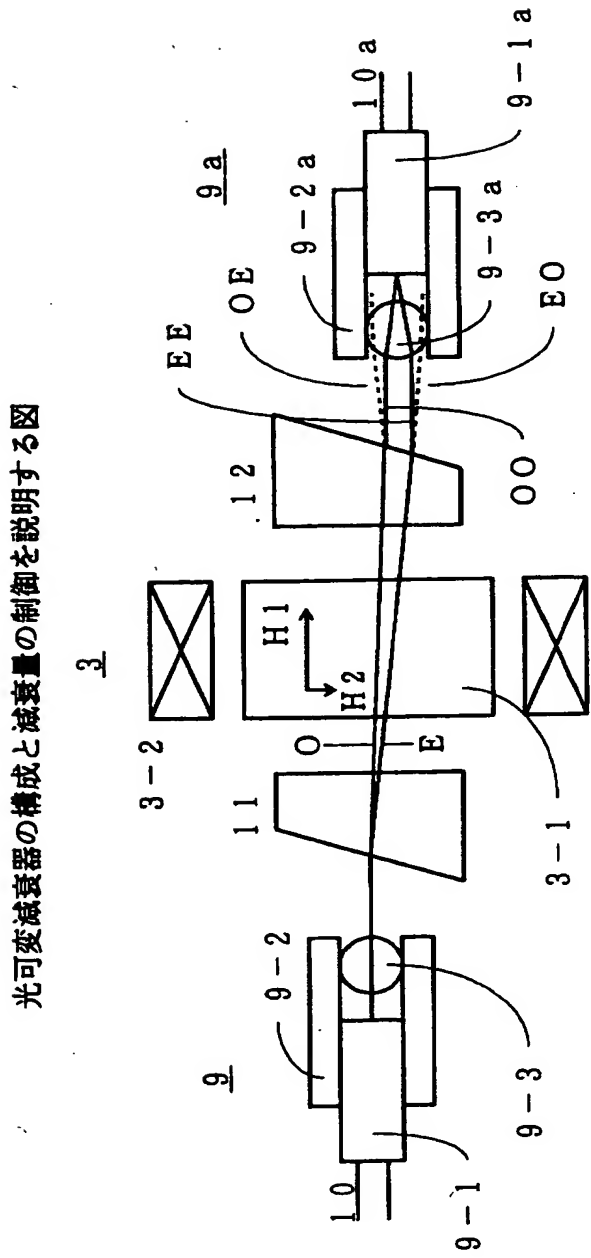
【図 27】



【図 28】

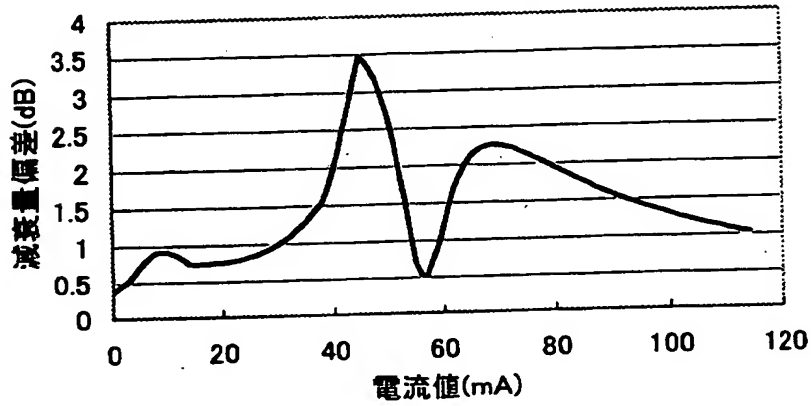


【圖 29】



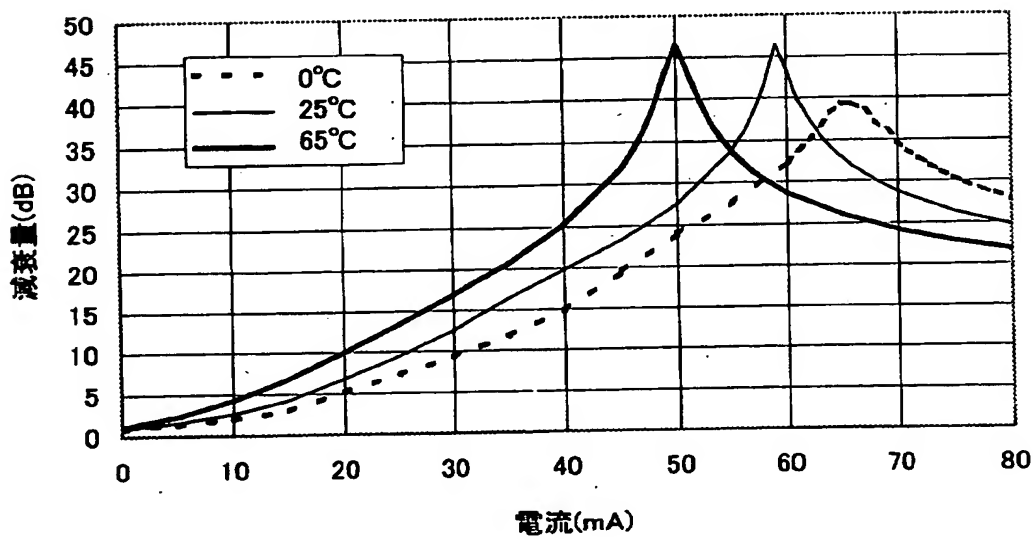
【図 3 0】

従来のファラデー回転子を適用した光可変減衰器の温度変動

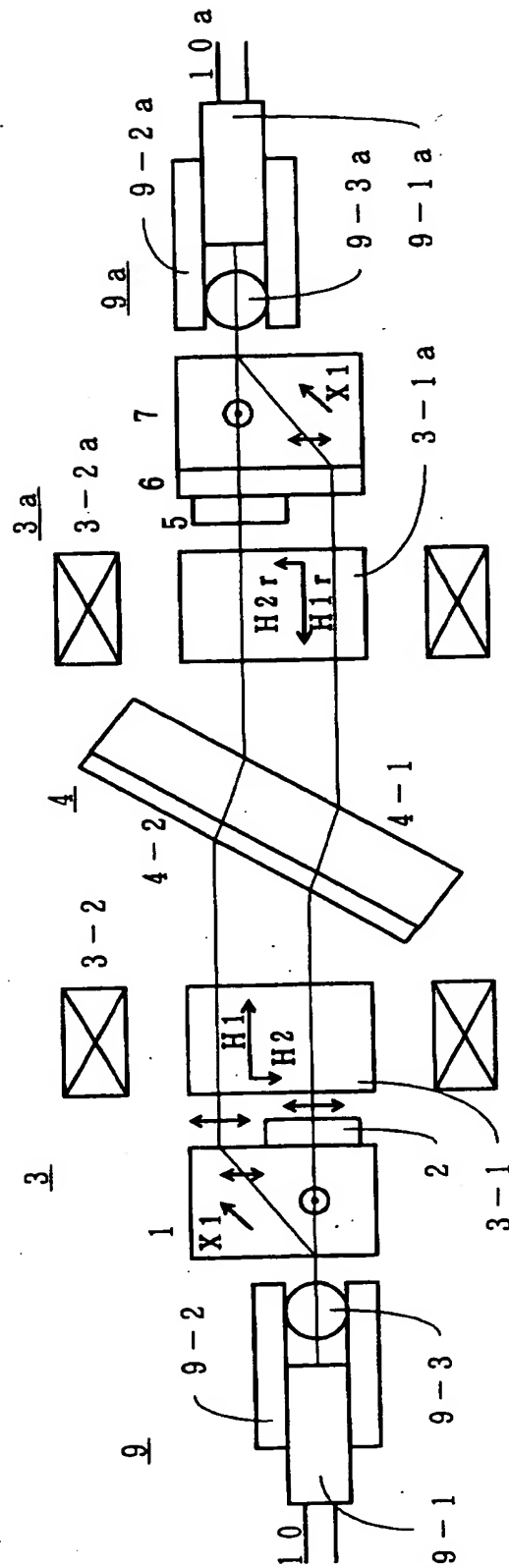


【図 3 1】

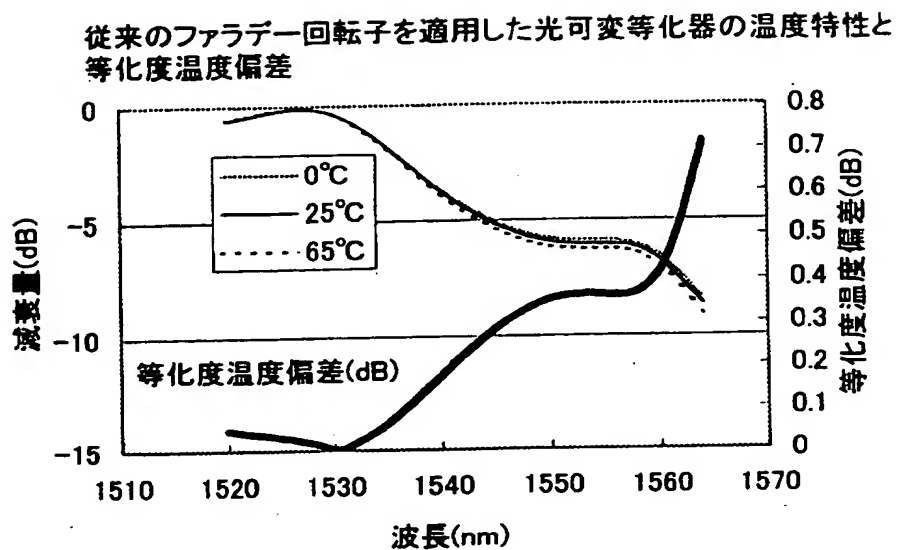
従来の光シャッタの温度特性



【図 3 2】



【図 3 3】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 ファラデー回転角の温度特性が良好な可変ファラデー回転子と該可変ファラデー回転子を適用する結果温度特性が良好な光可変減衰器、光シャッタ及び光可変等化器を提供する。

【解決手段】 ファラデー回転子は、ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に印加する第一の磁界によりファラデー回転を行ない、第二の磁界によりファラデー回転角の制御を行ない、該磁気光学結晶の磁化容易軸及び磁化困難軸の間に該第二の磁界の方向を設定して構成する。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005223]

1. 変更年月日 1996年 3月26日
[変更理由] 住所変更
住 所 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
氏 名 富士通株式会社